

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRÓNICA Y
AMBIENTAL
CARRERA PROFESIONAL INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“TÉCNICAS TOFD APLICADO A UNIONES A TOPE TERMOFUSIONADAS
EN TUBERÍAS DE HDPE PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN EL
PROYECTO CONSTANCIA MINERA HUBBAY PERÚ SAC”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
Para optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR EL BACHILLER

CHURAMPI CARRASCO, EDWING YOSIMAR

Villa El Salvador
2016



"Año de la Diversificación Productiva y del Fortalecimiento de la Educación"

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y AMBIENTAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TEMA DE ACTUALIDAD PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

En Villa El Salvador siendo las 17:30 del día lunes, 16 de noviembre de 2015, se reunieron en el Salón de Grados los Miembros del Jurado Evaluador del Tema de Actualidad integrado por:

Presidente : Ing. MARTÍN ISMAEL GONZALES BUSTAMANTE CIP N° 036182
Secretario : Ing. ELISEO PAEZ APOLINARIO CIP N° 19569
Vocal : Ing. ALVARO ENRIQUE CHÁVEZ ZUBIETA CIP N° 109559

Nombrados según RESOLUCIÓN DE FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y AMBIENTAL N° 368-2015-CO-P-FIMEA, de fecha 10 de noviembre de 2015

Se inició la Sesión Pública de Sustentación y Evaluación correspondiente, para obtener el Título Profesional en Ingeniero Mecánico Electricista, bajo la modalidad de Actualización Profesional. (Resolución de Comisión Organizadora N° 023-2012-UNTECS de fecha 20 de setiembre 2012, donde se APROBÓ la ratificación del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Tecnológica del Cono Sur de Lima y el Reglamento del Examen de Suficiencia Profesional para la Obtención de Título Profesional, siendo que el Art. 6° del precitado Reglamento del Examen de Suficiencia Profesional para la Obtención de Título Profesional, establece que: "El Examen de Suficiencia Profesional comprende dos etapas: a) Examen de Conocimientos Profesionales y b) Sustentación de un Tema Específico de Actualidad"), en la que

El bachiller: CHURAMPI CARRASCO, Edwing Yosimar

Sustentó su tema de Actualidad:

TECNICAS TOFD APLICADO A UNIONES A TOPE TERMOFUSIONADAS EN TUBERIAS DE HDPE PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN EL PROYECTO CONSTANCIA MINERA HUBBAY PERÚ SAC

Concluida la Sustentación del tema de Actualidad, se procedió a la calificación correspondiente según el siguiente detalle:

Condición: Aprobado con nota Dieciocho (18)
Equivalente: Muy Bueno De acuerdo al Art. 45° del Reglamento de Examen de Suficiencia Profesional para la Obtención del Título Profesional.

Siendo las 18:20 del día lunes, 16 de noviembre de 2015, se dio por concluido el acto de sustentación del tema de Actualidad, firmando el Jurado la presente Acta

Signature of Eliseo Paez Apolinario
SECRETARIO

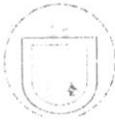
ELISEO PAEZ APOLINARIO
Ingeniero Mecánico - Electricista
O.I.P. 19569

Signature of Martín Ismael Gonzales Bustamante
PRESIDENTE

MARTIN ISMAEL GONZALES BUSTAMANTE
INGENIERO MECANICO
Reg. CIP N° 036182

Signature of Alvaro Enrique Chávez Zubieta
VOCAL

ALVARO ENRIQUE CHÁVEZ ZUBIETA
INGENIERO ELECTRONICO
Reg. CIP N° 109559



"Año de la Diversificación Productiva y del Fortalecimiento de la Educación"

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y AMBIENTAL

ACTA FINAL DEL EXAMEN DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

En Villa El Salvador siendo las 18:20 del lunes, 16 de noviembre de 2015, se reunieron en el Salón de Grados los Miembros del Jurado Evaluador del Examen de Suficiencia Profesional integrado por:

Presidente : Ing. MARTÍN ISMAEL GONZALES BUSTAMANTE CIP N° 036182
Secretario : Ing. ELISEO PAEZ APOLINARIO CIP N° 19569
Vocal : Ing. ALVARO ENRIQUE CHÁVEZ ZUBIETA CIP N° 109559

Nombrados según RESOLUCIÓN DE FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y AMBIENTAL N° 368-2015-CO-P-FIMEA, de fecha 10 de noviembre de 2015

Concluida la Sustentación del Tema de Actualidad se procede a registrar la nota obtenida en el Examen de Conocimientos Profesionales y la nota obtenida en la Sustentación del Tema Especifico de Actualidad, para obtener el Promedio Final del Examen de Suficiencia.

BACHILLEREVALUADO (A): CHURAMPI CARRASCO, Edwing Yosimar

Table with 5 columns: NOTA DEL EXAMEN DE CONOCIMIENTOS PROFESIONALES (12), NOTA DE SUSTENTACIÓN DEL TEMA ESPECIFICO DE ACTUALIDAD (18), PROMEDIO (15), CONDICION (Aprobado), EQUIVALENTE (Bueno)

Signatures and stamps of the examiners: ELISEO PAEZ APOLINARIO (Secretario), MARTIN ISMAEL GONZALES BUSTAMANTE (Presidente), ALVARO ENRIQUE CHÁVEZ ZUBIETA (Vocal)

A mi Madre Guadalupe,

a mi Esposa Odelli y

a mi Pequeño Hijo Renato.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, porque me dio la oportunidad de culminar la carrera y así cumplir un gran objetivo en mi vida, iluminando mi camino día a día.

A la UNTELS, alma mater que me dio la oportunidad de cursar una carrera profesional y así cumplir con un gran objetivo de mi vida.

A mi Madre, porque con su apoyo, cariño, consejos y ejemplo me han otorgado las habilidades y capacidades que me permitirán enfrentar la vida con éxito. Por darme la vida e inculcarme los valores que ahora poseo, por todo el amor que a lo largo de todo este tiempo he recibido de su parte, además por haberme apoyado en los momentos más difíciles y porque sin su apoyo me hubiera sido más difícil culminar mis estudios, le dedico esta tesis que espero sienta satisfecha con lo que he logrado.

A mi Esposa, porque con su apoyo, cariño y compañía me permite seguir adelante con mis proyectos y metas propuestas en la vida. Por darme el mejor regalo de la vida nuestro pequeño y querido hijo y por ser ella quien me da la convicción para seguir adelante.

A mi Pequeño Hijo, porque al momento de verlo y sentirlo me dan fuerzas para seguir adelante y conseguir todas mis metas propuestas en la vida.

A mi Familia, porque espero les sirva de buen ejemplo este trabajo y que vean que si se puede lograr lo que uno se propone en la vida.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	xviii
--------------	-------

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	Descripción de la Realidad Problemática	1
1.2	Justificación del Problema	1
1.3	Delimitación del Proyecto	3
1.4	Formulación del Problema	3
	1.4.1 Problema General	3
	1.4.2 Problemas Específicos	3
1.5	Objetivos	3
	1.5.1 Objetivo General	3
	1.5.2 Objetivos Específicos	4

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1	Antecedentes de la Investigación	5
2.2	Bases Teóricas	8
	2.2.1 Ultrasonidos	8
	2.2.2 Ondas Acústicas	8
	2.2.3 Parámetros de las Ondas Acústicas Ultrasónicas	10

2.2.3.1	Frecuencia	11
2.2.3.2	Amplitud	11
2.2.3.3	Longitud de Onda	12
2.2.3.4	Velocidad Acústica	12
2.2.3.5	Presión Acústica	13
2.2.3.6	Impedancia Acústica	13
2.2.3.7	Energía Acústica Específica	14
2.2.3.8	Intensidad Acústica	14
2.2.3.9	Atenuación	15
2.2.4	Tipos de Ondas Ultrasónicas	15
2.2.4.1	Ondas Longitudinales	15
2.2.4.2	Ondas Transversales	17
2.2.4.3	Ondas Superficiales	19
2.2.4.4	Ondas Lamb	20
2.2.4.5	Ondas de Borde	21
2.2.5	Conversión de Ondas Ultrasónicas	22
2.2.5.1	Incidencia Perpendicular o Normal	22
2.2.5.2	Incidencia Angular u Oblicua	24
2.2.6	Generación de Ondas Ultrasónicas	28
2.2.6.1	Elementos de un Transductor	29
2.2.6.2	Tipos de Transductores	30
2.2.7	Características de los Transductores	31
2.2.7.1	Haz y Campo Ultrasónico	32

2.2.7.2	Divergencia del Haz	34
2.2.7.3	Longitud de Pulso de un Transductor	36
2.2.7.4	Ancho de Banda de un transductor	38
2.2.8	Tiempo de Vuelo de Difracción (TOFD)	41
2.2.8.1	Configuración de la Técnica TOFD	42
2.2.8.2	Parámetros de la Técnica TOFD	44
2.2.8.3	Trayectoria de Ondas Acústicas	45
2.2.8.4	Tiempos de Vuelo	47
2.2.8.5	Ángulos de Refracción	48
2.2.8.6	Zonas Muertas	49
2.2.8.7	Resolución Espacial	50
2.3	Marco Conceptual	50

CAPITULO III: TÉCNICAS TOFD APLICADO A UNIONES A TOPE TERMOFUSIONADAS

3.1	Análisis de la Técnica TOFD	57
3.1.1	Equipo de Ultrasonido SIUI SUPOR	57
3.1.1.1	Parámetros de Transmisión	58
3.1.1.2	Parámetros de Recepción	60
3.1.2	Transductores	60
3.1.3	Cuñas de acople y cables	61
3.1.4	Encoder	63

3.1.5	Interpretación de la Técnica TOFD, Basado en la Norma ASME V, Artículo 4, Apéndice N. Time Of Flight Diffraction (TOFD) Interpretation	63
3.1.5.1	Morfología de Defectos y Generación de Imágenes B-Scan	66
3.2	Construcción de la Técnica TOFD	69
3.2.1	Control de calidad de las soldaduras a tope	69
3.2.1.1	Condiciones de trabajo	69
3.2.1.2	Alineamiento	70
3.2.1.3	Parámetros de soldadura	70
3.2.1.4	Diferencia de espesores	70
3.2.2	Métodos No Destructivos	72
3.2.2.1	Inspección Visual	72
3.2.2.2	Inspección por Ultrasonido	73
3.2.2.3	Configuración del Equipo	74
3.2.2.4	Unidad de búsqueda	79
3.2.2.5	Bloques de Calibración	80
3.2.2.6	Criterios de Aceptación	82
3.3	Consolidación de Resultados	85
3.3.1	Inspecciones de los Diferentes Espesores Mediante la Técnica TOFD	85
3.3.1.1	Inspección 1: Ø12" SDR 17, Espesor 18 mm	85
3.3.1.2	Inspección 2: Ø16" SDR 17, Espesor 24 mm	87

3.3.1.3	Inspección 3: Ø20" SDR 17, Espesor 30 mm	90
3.3.1.4	Inspección 4: Ø24" SDR 17, Espesor 36 mm	92
3.3.1.5	Inspección 5: Ø30" SDR 11, Espesor 70 mm	95
3.3.1.6	Inspección 6: Ø32" SDR 11, Espesor 74 mm	97
3.3.1.7	Ejemplo de Junta con Defecto	100
CONCLUSIONES		101
RECOMENDACIONES		102
BIBLIOGRAFÍA		103
ANEXOS		105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Espectro de ondas acústicas	9
Figura 2.- Características de las ondas	11
Figura 3.- Onda longitudinal o de compresión	16
Figura 4.- Onda transversal o de corte	18
Figura 5.- Onda Lamb simétrica o de compresión	20
Figura 6.- Onda Lamb asimétrica o de flexión	21
Figura 7.- Ondas de borde producido por defecto	21
Figura 8.- Incidencia perpendicular de las ondas	23
Figura 9.- Incidencia angular de las ondas	25
Figura 10.- Reflexión y refracción de onda con incidencia angular	26
Figura 11.- Ángulos críticos de refracción de un material.	28
Figura 12.- Esquema y partes de un Transductor de Ultrasonido	29
Figura 13.- Haz ultrasónico de un transductor	33
Figura 14.- Ángulo total de divergencia para diferentes límites de atenuación	35
Figura 15.- Longitud de pulso ultrasónico según la norma ASTM E1065	37
Figura 16.- Representación espectral del ancho de banda de un transductor ultrasónico según la norma ASTM E1065	39
Figura 17.- Clasificación de transductores según el ancho de banda relativo.	40
Figura 18.- Configuración general de la técnica TOFD	43
Figura 19.- Ejemplo de una imagen bidimensional con la técnica TOFD	43

Figura 20.- Proceso de formación de un B-Scan con la técnica TOFD	44
Figura 21.- Señal temporal de la técnica TOFD con ondas longitudinales	48
Figura 22.- Vista frontal de SIUI SUPOR	57
Figura 23.- Transductores SIUI de 3.5 MHz	61
Figura 24.- Cuñas con diferentes ángulos de incidencia	62
Figura 25.- Cable coaxial LEMO 00	62
Figura 26.- Encoder SIUI	63
Figura 27.- Transformación de onda que muestra escala de grises	64
Figura 28.- Generación de escala de grises B-Scan a partir de múltiples A-Scan	65
Figura 29.- Pantalla B-Scan con múltiples defectos	65
Figura 30.- Defecto interior por grieta superficial	66
Figura 31.- Defecto exterior por grieta superficial	66
Figura 32.- Defecto en centro de cordón de soldadura	66
Figura 33.- Defecto por falta de penetración en la raíz	67
Figura 34.- Defecto por concavidad en la raíz	67
Figura 35.- Defecto por falta de fusión en pared lateral	67
Figura 36.- Defecto por poros	68
Figura 37.- Defecto por grieta transversal	68
Figura 38.- Localización del LW, BW y cuatro defectos	69
Figura 39.- Sección de soldadura a tope incorrecto	71
Figura 40.- Sección de soldadura a tope correcto	71
Figura 41.- Proceso de soldadura a tope por termofusión	72

Figura 42.- Calibración de Retardo	75
Figura 43.- Ejemplo de una configuración con una simple zona de inspección	77
Figura 44.- Ejemplo de una configuración con dos zonas de inspección (igual altura de las zonas)	77
Figura 45.- Ejemplo de una configuración con tres zonas de inspección	77
Figura 46.- Ejemplo de una configuración con cuatro zonas de inspección (igual altura de las zonas)	78
Figura 47.- Bloque de referencia para una zona de inspección	82
Figura 48.- Bloque de referencia para dos zonas de inspección	82
Figura 49.- Configuración de Junta Inspección 1	85
Figura 50.- Bloque de Referencia Inspección 1	86
Figura 51.- Vista A-Scan Inspección 1	86
Figura 52.- Vista B-Scan Inspección 1	86
Figura 53.- Configuración de Junta Inspección 2	88
Figura 54.- Bloque de Referencia Inspección 2	88
Figura 55.- Vista A-Scan Inspección 2	89
Figura 56.- Vista B-Scan Inspección 2	89
Figura 57.- Configuración de Junta Inspección 3	90
Figura 58.- Bloque de Referencia Inspección 3	91
Figura 59.- Vista A-Scan Inspección 3	91
Figura 60.- Vista B-Scan Inspección 3	91
Figura 61.- Configuración de Junta Inspección 4	93

Figura 62.- Bloque de Referencia Inspección 4	93
Figura 63.- Vista A-Scan Inspección 4	94
Figura 64.- Vista B-Scan Inspección 4	94
Figura 65.- Configuración de Junta Inspección 5	95
Figura 66.- Bloque de Referencia Inspección 5	96
Figura 67.- Vista A-Scan y B-Scan Inspección 5	96
Figura 68.- Configuración de Junta Inspección 6	97
Figura 69.- Bloque de Referencia Inspección 6	98
Figura 70.- Vista A-Scan y B-Scan Inspección 6	99
Figura 71.- Vista A-Scan y B-Scan con Defecto	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades acústicas de materiales comúnmente usados en END	19
Tabla 2.- Valores de campo próximo (mm) de los transductores empleados en la técnica TOFD	34
Tabla 3.- Constante K para el cálculo del ángulo de divergencia	35
Tabla 4.- Ángulo de divergencia en HDPE para diferentes límites de atenuación	36
Tabla 5.- Parámetros de configuración en la medición de velocidades acústicas	58
Tabla 6.- Ángulos de incidencia de las cuñas de acople	62
Tabla 7.- Tipos de cordón	73
Tabla 8.- Parámetros para una zona, aplicable hasta 3 in (75 mm)	78
Tabla 9.- Parámetros para múltiples zonas, aplicable hasta 12 in (300 mm)	79
Tabla 10.- Recomendaciones de la división de las zonas de inspección	79
Tabla 11.- Criterios de Rangos de Severidad de la Soldadura	84
Tabla 12.- Criterios de aceptación dados en el Código ASME B31.3, Edición 2012	84
Tabla 13.- Parámetros Insertados al Equipo Inspección 1	85
Tabla 14.- Datos del Bloque de Referencia Inspección 1	86
Tabla 15.- Datos Evaluados Inspección 1	87
Tabla 16.- Parámetros Insertados al Equipo Inspección 2	87

Tabla 17.- Datos del Bloque de Referencia Inspección 2	88
Tabla 18.- Datos Evaluados Inspección 2	89
Tabla 19.- Parámetros Insertados al Equipo Inspección 3	90
Tabla 20.- Datos del Bloque de Referencia Inspección 3	91
Tabla 21.- Datos Evaluados Inspección 3	92
Tabla 22.- Parámetros Insertados al Equipo Inspección 4	92
Tabla 23.- Datos del Bloque de Referencia Inspección 4	93
Tabla 24.- Datos Evaluados Inspección 4	94
Tabla 25.- Parámetros Insertados al Equipo Inspección 5	95
Tabla 26.- Datos del Bloque de Referencia Inspección 5	96
Tabla 27.- Datos Evaluados Inspección 5	97
Tabla 28.- Parámetros Insertados al Equipo Inspección 6	98
Tabla 29.- Datos del Bloque de Referencia Inspección 6	98
Tabla 30.- Datos Evaluados Inspección 6	99

INTRODUCCION

Para llevar a cabo el proyecto sobre la Relación de la Técnica de TOFD con Uniones a Tope Termofusionadas en Tuberías de HDPE en el Control de Calidad en el Proyecto Constancia Minera HUDBAY PERU SAC, asimismo, para un estudio sistematizado del problema, el proyecto se ha estructurado de la siguiente manera. En el Capítulo I: Planteamiento del problema. Aquí se exponen la Descripción de la Realidad Problemática, Justificación del Problema, Delimitación del Proyecto, Formulación del Problema y Objetivos. En el Capítulo II: Marco Teórico. Aquí se exponen los Antecedentes de la Investigación, Bases Teóricas y Marco Conceptual. Capítulo III: Técnicas TOFD Aplicado a Uniones a Tope Termofusionadas. Aquí se exponen el Análisis de la Técnica TOFD, Construcción de la Técnica TOFD y Consolidación de Resultados. Finalmente, se redactan las CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFIA y ANEXOS, Procedimiento de Examinación de Uniones Soldadas y Termofusionadas por Ultrasonido Mediante la Técnica Time OF Flight Diffraction (TOFD), de Acuerdo al Código ASME Sección V-Art 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373-04, Modelo de reporte, PQR, WPQ, Plano de ubicación y Resumen de juntas.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la Realidad Problemática

En la inspección del material expuesto en este trabajo, se tiene en consideración que los problemas surgen a partir de una mala interpretación de las indicaciones mostradas por el equipo, los factores a tomar en cuenta son: inadecuada calibración de los equipos usados en la inspección, la errónea interpretación de las indicaciones realizadas por el personal encargado de la inspección o la incorrecta interpretación de la norma usada para inspeccionar dicho elemento. En nuestro trabajo nos basaremos a la Norma ASME B31.3 Process Piping.

1.2 Justificación del Problema

La detección de discontinuidades en piezas metálicas o no metálicas con ultrasonidos se suele realizar aplicando la técnica de contacto de forma manual, semiautomática o automática. Dicho procedimiento implica desplazar el sensor por toda la pieza buscando posibles defectos con un equipo portátil. En dicho equipo

se visualizan los ecos ultrasónicos recibidos y, directamente en la pieza, se van señalando mediante marcas los puntos donde se encuentran los posibles defectos. La detección se realiza analizando la morfología de los ecos procedentes de las piezas objeto de estudio y comparándolos con un eco patrón de una pieza o zona libre de defectos.

Dado a que la garantía de la inspección con END depende en gran medida del personal responsable de la realización de la inspección, se debe seguir ciertos lineamientos que deben ser alcanzados para la selección, capacitación, calificación y certificación del personal que efectúa la inspección o evalúa la defectología que puede encontrarse en métodos de pruebas tales como: Ensayo de ultrasonido, Ensayo por líquidos penetrantes o ensayo por Partículas Magnéticas.

Para nuestro proyecto se aplica la técnica TOFD, dado a que la garantía de la inspección frente a otra técnica por ultrasonido es de mayor sensibilidad, se podrá realizar la caracterización de la morfología y/o defectos en tuberías de HDPE, para diferentes espesores (18 mm / 24 mm / 30 mm / 36 mm / 70 mm / 74 mm). Verificando de esta manera su sensibilidad, ya que recordemos que el HDPE es un material con una pobre propagación del sonido.

Así mismo será de mucha ayuda para el Área de Control de Calidad, ya que se verificara por qué se originan los defectos en las uniones termofusionadas, si es por el factor clima, ambiente u operador, implementando las medidas correctivas.

1.3 Delimitación del Proyecto

1.3.1 Espacial

El proyecto se desarrolló en los distritos de Elille, Chamaca y Livitaca. Provincia Chumbivilcas. Región Cusco.

1.3.2 Temporal

El periodo de duración del proyecto, comprende entre los meses de Abril a Noviembre del 2014 teniendo un tiempo de vida esperado de 20 años en todas las líneas de tubería.

1.4 Formulación del Problema

1.4.1 Problema General

- ¿Cómo afectará la alta atenuación del material HDPE a la técnica TOFD?

1.4.2 Problemas Específicos

- ¿Cómo será la calibración del equipo usado en la inspección?
- ¿Cuál será la interpretación de la norma ASME B31.3 en la inspección?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Realizar la caracterización de la morfología y/o defectos en tuberías de HDPE, para diferentes espesores (18 mm / 24 mm / 30 mm / 36 mm / 70 mm / 74 mm).

1.5.2 Objetivos Específicos

Las calibraciones y posterior inspecciones deberán estar en concordancia con los requerimientos de la última edición de la ASNT SNT-TC-1A. Se realizó una calibración para cada espesor mostrado en este proyecto.

Daremos énfasis en los criterios de aceptación para la inspección ultrasónica por TOFD, basados en la Norma ASME B31.3 Process Piping; mediante la técnica pulso eco en tuberías de HDPE.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Lenin José Brito Hernández (Noviembre 2004). Caracterización de defectos inducidos en patrones de Acero AISI 304 a través de Radiografía, TOFD y Ultrasonido. Proyecto de Grado, Universidad Simón Bolívar de Sartenejas Venezuela; en sus conclusiones manifiesta: (a) La creación de patrones soldados, tiene gran importancia en los procesos de inspección, ya que de esta forma se pueden obtener distintas señales representativas de un tipo de discontinuidad y así podr identificarlas en un momento dado, y rechazar o no, una pieza que se encuentra en condiciones de servicio (p. 112). (b) El rechazo o la aceptación de una unión soldada, depende del tipo, la cantidad y la dimensión de las discontinuidades presentes (p. 112).

Msc. Roberto Henry Herrera Marrero (Enero 2006). Deconvolución de señales ultrasónicas en la evaluación no destructiva. Tesis Doctoral, Universidad Central Marta Abreu de las Villas de Cienfuegos Cuba; en sus conclusiones manifiesta: (a) Se demuestra la capacidad del método HOSA, aplicado a señales ultrasónicas en

la evaluación no destructiva, obteniendo valores de MSE que superan los métodos basados en cepstrum y comparables con las propuestas basadas en wavelets reportadas en la literatura. Se elimina además la restricción de fase mínima de los modelos previos (Referente a la estimación del pulso) (p. 101). (b) Se corrobora que la etapa de deconvolución de las señales RF contribuye a la calidad de la imagen acústica en cuanto al incremento de la SNR, pero la influencia en la calidad total de la imagen está dominada por la resolución lateral, obteniendo en la implementación propuesta del algoritmo SAFT, parámetros de resolución comparables con los reportes actuales. (Referente a la conformación de imágenes acústicas) (p. 102). (c) El MICONS dispone de un estudio detallado del estado actual de la temática de los ensayos no destructivos a nivel mundial y recibe un conjunto de aplicaciones de procesamiento digital de señales, que pueden ayudar a sus especialistas en la interpretación y análisis de las señales ultrasónicas, sentando las bases para la generación de imágenes acústicas a nivel de campo (Referente a la aplicación de los resultados) (p. 102).

Julie Carolina Sánchez Sarmiento (2012). Estudio del ensayo no destructivo ultrasónico aplicado a líneas de tubería submarinas en mantenimiento. Trabajo de Grado, Universidad Libre de Bogotá Colombia; en sus conclusiones manifiesta: (a) Con los datos obtenidos mediante las pruebas realizadas, se puede comprobar que la técnica de ultrasonido por inmersión para líneas de tuberías submarinas, es una técnica confiable en la evaluación de medición de pérdida de espesores a nivel externo (p. 45). (b) Se encontró también que el ensayo ultrasónico es uno de los métodos más rápidos, fáciles y seguros de aplicar, debido a que posee una

gran exactitud en el momento de la evaluación de las condiciones de tuberías (p. 45).

Lic. Cristina Rodríguez González (2012). Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonido. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria de Santander España; en sus conclusiones manifiesta: (a) Además se ha obtenido una exploración óptima de los defectos que presentan las piezas metálicas inspeccionadas, obteniéndose de forma automática información sobre la posición, la morfología y el tamaño de los mismos ya que, tras la inspección completa de la pieza, se obtiene un completo informe de resultados (p. 219). (b) Se ha obtenido una buena clasificación de los defectos, sobre todo en cuanto a su morfología, aunque no se ha podido determinar unas características determinantes que sean comunes para todos los clasificadores considerados (p. 219).

Ing. José Fabricio Cuenca Granda (Julio 2013). Desarrollo y experimentación de un sistema ultrasónico TOFD configurable. Trabajo Final de Master, Universidad Politécnica de Valencia de Valencia España; en sus conclusiones manifiesta: (a) El desarrollo experimental estuvo conformado por un sinnúmero de mediciones que principalmente se realizaron sobre las probetas de duraluminio y de las cuales se conocían perfectamente sus morfologías internas y características acústicas. De esta manera se lograba contrastar las dimensiones reales de los defectos de las probetas con los resultados que se iban adquiriendo en la ejecución de esta técnica. Luego, los problemas que se presentaban en las

experimentaciones, eran solucionadas adecuadamente con el conocimiento contrastado de las diferentes referencias bibliográficas citadas (p. 91). (b) Respecto a los ángulos de incidencia utilizados, estos estuvieron limitados a las características físicas de las cuñas disponibles, solo en el caso del transductor de 2 MHz, hubo la posibilidad de variar los ángulos de incidencia, posibilitando trabajar con velocidades longitudinales. No así en el resto de cuñas, que tienen un ángulo fijo, por lo tanto, la inspección se limitó al uso de las velocidades transversales, contrario a lo que recomiendan las normas (únicamente longitudinales), pero que en este trabajo se obtuvieron resultados bastante aceptables con el empleo de las mismas (p. 91).

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Ultrasonidos

Los ultrasonidos son unas ondas mecánicas, del mismo tipo que las ondas audibles y con frecuencias superiores al espectro auditivo del ser humano, y que actualmente con el desarrollo de la tecnología son ampliamente utilizados en diferentes aplicaciones de la vida moderna.

A continuación se describe la clasificación de estas ondas mecánicas atendiendo a la principal característica que las identifican, como es la frecuencia.

2.2.2 Ondas Acústicas

Las ondas sonoras se dividen en tres grupos: la infrasónica, con frecuencias menores a 16 Hz y que no son percibidas por los seres humanos; la sónica, que está comprendida en el rango 16 Hz a 16 kHz y, finalmente la ultrasónica, donde las oscilaciones son mayores a 20kHz.

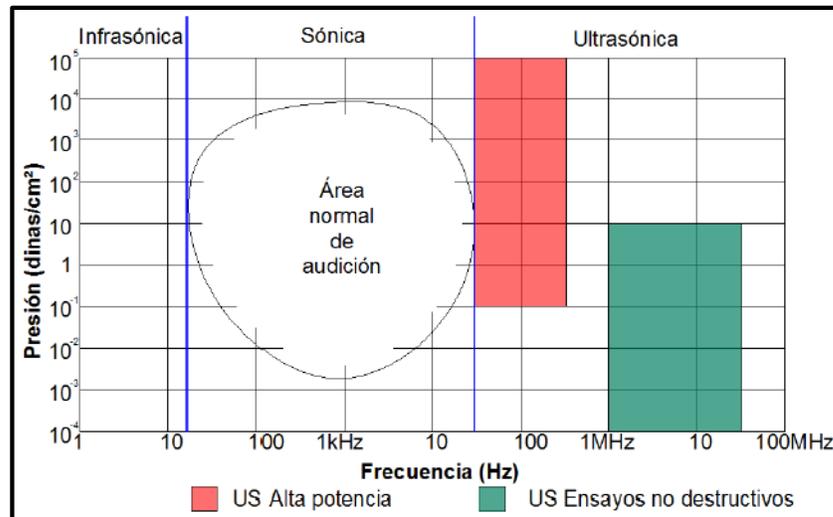


Figura 1.- Espectro de ondas acústicas

El rango de las ondas sónicas, son las frecuencias a las que se producen la mayoría de los sonidos audibles, sin embargo, una onda acústica pudiera no ser escuchado por el oído humano al no tener el mínimo de presión necesaria para ser registrada, o por sobrepasar la máxima presión que soportan los mecanismos físicos de este órgano. [1]

Las oscilaciones ultrasónicas, son aquellas utilizadas principalmente en Ensayos No Destructivos (END) para la detección de fallas, discontinuidades en piezas metálicas y no metálicas, sin llegar a la destrucción de la pieza a inspeccionar.

2.2.3 Parámetros de las Ondas Acústicas Ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas es otra forma de movimiento ondulatorio, donde las partículas que conforman el medio de propagación se desplazan sobre su posición de equilibrio e inducen perturbaciones a través de los enlaces elásticos con sus adyacentes; de esta manera, posibilitan la propagación de energía acústica a través de las partículas sin que haya un desplazamiento de todo el conjunto.

Estas ondas necesitan de un medio material elástico o viscoelástico para su propagación, pudiendo ser: líquido, gaseoso y/o sólido; no logrando así la transmisión en el vacío como lo hacen las ondas electromagnéticas.

La expresión que describe el movimiento ondulatorio de las ondas en dependencia del tiempo (t) y de la dimensión espacial (x) (sobre el eje de vibración) es la siguiente [2]:

$$U(x, t) = A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

Dónde:

A = Amplitud de oscilación (m).

T = Periodo de Ondulación (s).

λ = Longitud de onda (m).

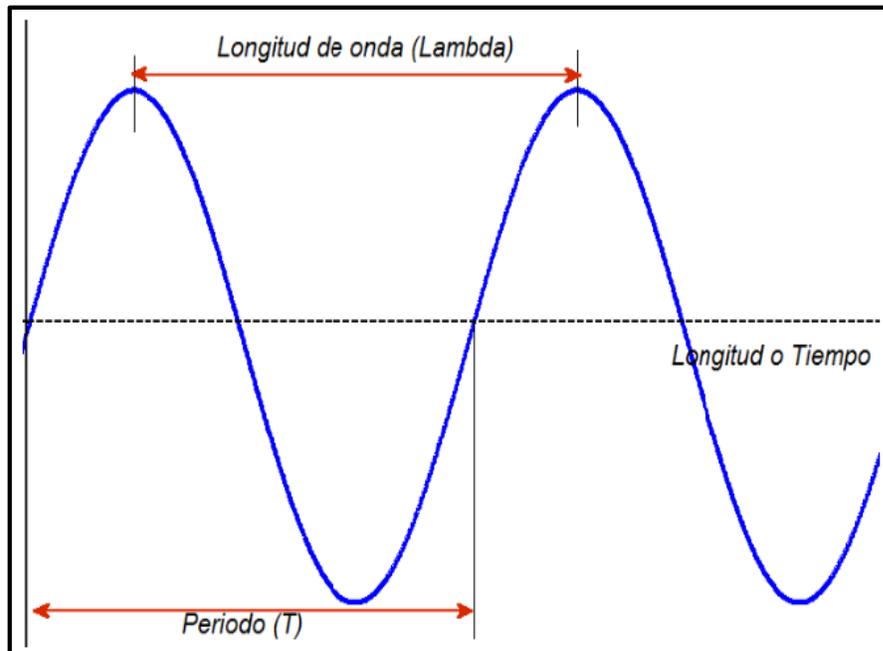


Figura 2.- Características de las ondas

A continuación se detalla los principales parámetros que gobiernan este tipo de ondas.

2.2.3.1 Frecuencia

Es el número de oscilaciones que realizan las partículas por cada unidad de tiempo. Se mide en Hertz (ciclo/segundo). Matemáticamente es el inverso del periodo de oscilación de la onda.

$$f = T^{-1} \quad (2)$$

2.2.3.2 Amplitud

Es la intensidad de la onda acústica correspondiente a la deflexión máxima de las partículas del medio de transmisión.

2.2.3.3 Longitud de Onda

En un haz de ultrasonido, es la distancia entre dos planos inmediatos de partículas que se encuentran en el mismo estado de movimiento. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia. Puede ser calculado con la expresión (3).

2.2.3.4 Velocidad Acústica

Es la rapidez con la que se propagan las ondas acústicas a través del medio. Es constante y característica de cada material sea cual sea la frecuencia.

En los metales, ante variaciones de la temperatura, la velocidad es constante y no cambia significativamente, no así en líquidos y gases, donde las variaciones de presión y temperatura modifican la velocidad característica de propagación en ese medio [1].

La velocidad acústica depende de la densidad y de la elasticidad del material que está atravesando, y es igual al producto de la frecuencia (f) por la longitud de onda (λ):

$$C = f\lambda \quad (3)$$

De acuerdo al tipo de onda que aparezca en el material y para una misma frecuencia, hay velocidades muy características que son propias de cada material, algunos de esos valores están presentados en la Tabla 1.

2.2.3.5 Presión Acústica

Ésta se define como la diferencia entre la presión instantánea y la presión atmosférica estática, no solo ocurre en los gases, también en líquidos y en sólidos.

2.2.3.6 Impedancia Acústica

Es una característica del medio donde atraviesa el ultrasonido, definiéndose como: la relación entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibración de las partículas. Esta relación se calcula con el producto de la densidad del medio y la velocidad de propagación de la onda, tal como se indica en la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{P}{v} = \rho C \quad (4)$$

Dónde:

Z = Impedancia acústica ($\text{kg/m}^2\text{s}$).

P = Presión acústica (N/m^2).

v = Velocidad instantánea de vibración de la partícula (m/s).

ρ = Densidad del material (kg/m^3).

C = Velocidad acústica (m/s).

En otras palabras, la impedancia, es la resistencia que opone un medio a las deformaciones elásticas de las partículas causadas por la vibración de la onda [5].

Dependiendo de este valor, los medios se pueden clasificar en: acústicamente duros, cuando sus elementos de masa varían muy poco su velocidad de vibración a pesar de una gran diferencia de presión; y acústicamente blandos, cuando con una pequeña diferencia de presión sus partículas vibran a gran velocidad [1].

La propagación de las ondas es mejor en materiales acústicamente duros, debido a que la impedancia acústica se opone únicamente a las vibración de las partículas, más no a la propagación de las ondas. En la Tabla 1, se observa los valores de impedancia para los materiales más comunes en tareas de ensayos no destructivos.

2.2.3.7 Energía Acústica Específica

La propagación de una onda se caracteriza por un transporte de energía pero no de masa. La energía acústica específica (E_e) se define como la energía por unidad de volumen del medio cuando avanza con la velocidad acústica (C), ésta se expresa de la siguiente manera [3]:

$$E_e = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho C^2} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{ZC} \quad (5)$$

2.2.3.8 Intensidad Acústica

Se define como: la cantidad de energía que pasa por unidad de área, y por unidad de tiempo. Se obtiene mediante el producto de la energía específica por la velocidad acústica [3].

$$I = \frac{1}{2} \rho V^2 C = \frac{1}{2} Z V^2 = \frac{P^2}{2Z} \quad (6)$$

La unidad de la intensidad acústica (I) es el Belio; Belio = I/I₀; donde I₀ es la intensidad de referencia, por lo tanto el número de belios, nos da el nivel de intensidad acústica.

2.2.3.9 Atenuación

Es la disminución de la amplitud de una oscilación en función del tiempo y se produce por la propia absorción de los ultrasonidos en el medio y la dispersión a causa de la falta de homogeneidad en la estructura de los materiales.

2.2.4 Tipos de Ondas Ultrasonicas

En cualquier medio, las partículas forman una red cristalina y, cuando se ejerce sobre ellos una presión, éstas se desplazan de sus posiciones de equilibrio describiendo oscilaciones con distintas trayectorias dependiendo de la energía mecánica que se aplica [3].

A continuación se describen los tipos de ondas más importantes.

2.2.4.1 Ondas Longitudinales

Este modo de vibración también conocido como ondas de compresión, se presentan en medios sólidos, líquidos y gaseosos.

Con la presencia de una presión perpendicular a la superficie del material se origina una perturbación en las partículas y, esa vibración, empuja o hala a las partículas adyacentes por medio de los vínculos elásticos y, es ahí donde aparecen zonas de compresión (partículas muy juntas) y zonas de depresión (partículas muy separadas). Por lo tanto, este tipo de onda se caracteriza por la oscilación de las partículas en la misma dirección que el sentido de propagación de la onda. Ver Figura 3.

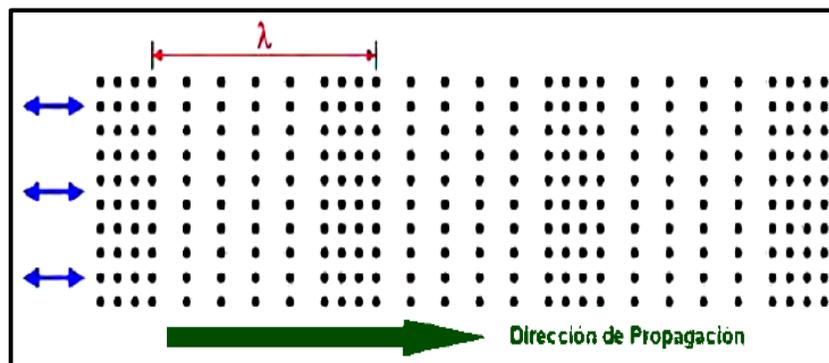


Figura 3.- Onda longitudinal o de compresión.

Estas ondas de propagación longitudinales tienen una velocidad característica muy particular para cada medio, intrínseca únicamente a sus propiedades físicas e independiente de la frecuencia de oscilación de la onda.

Para el cálculo de esta velocidad, se utiliza la siguiente expresión

[1]:

$$C_L = \sqrt{\left(\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}\right)} \quad (7)$$

Dónde:

C_L = Velocidad longitudinal (m/s).

E = Módulo de elasticidad (N/m²).

μ = Coeficiente de Poisson (adimensional).

ρ = Densidad del material (kg/m³).

2.2.4.2 Ondas Transversales

También conocidas como ondas de corte o de cizalladura, éstas se generan únicamente en los materiales sólidos, ya que los medios líquidos y gaseosos no tienen enlaces elásticos transversales, imposibilitando que las vibraciones de las partículas sean transmitidas a las contiguas.

La generación de estas ondas aparece cuando se aplica en un extremo del material sólido, una fuerza cortante y periódica, que provoca una vibración de las partículas, que es perpendicular al sentido de propagación de las ondas, ver Figura 4.

Para el cálculo de la velocidad transversal se utiliza la siguiente expresión [1]:

$$C_T = \sqrt{\left(\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}\right)} \quad (8)$$

Dónde:

C_T = Velocidad transversal (m/s).

E = Módulo de elasticidad (N/m²).

μ = Coeficiente de Poisson (adimensional).

ρ = Densidad del material (kg/m³).

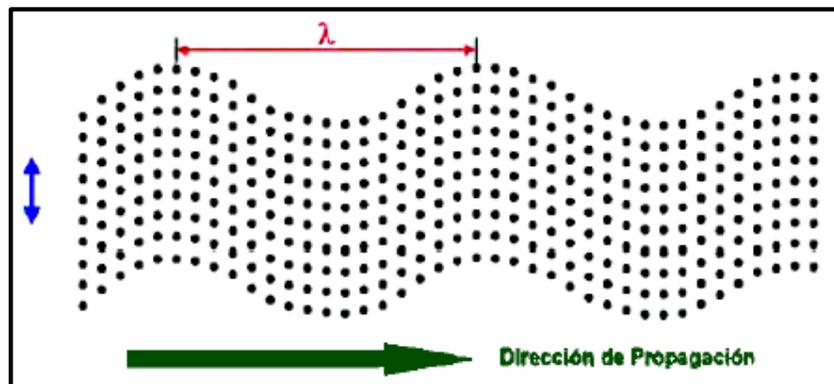


Figura 4.- Onda transversal o de corte

Las velocidades de las ondas acústicas en un mismo material, tanto longitudinal como trasversal, se relacionan entre sí mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{C_T}{C_L} = \sqrt{\left(\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}\right)} \quad (9)$$

El coeficiente de Poisson (μ), oscila entre 0 y 0.5 para todos los sólidos, por lo tanto, para este tipo de medios se puede asegurar que la velocidad trasversal es menor que la longitudinal.

Se recopilaron valores de velocidad de los principales materiales mayormente utilizados en Ensayos No Destructivos por Ultrasonido. Estos valores están tabulados en la siguiente tabla:

Tabla 1
Propiedades acústicas de materiales comúnmente usados en END

Material	Velocidad Longitudinal C_L (m/s)	Velocidad Transversal C_T (m/s)
Acrylic resin (Perspex, Plexiglás)	2730	1430
Aluminum	6320	3130
Iron	5900	3230
Steel, 1020	5890	3240
Steel, 4340	5850	3240
Steel, 302	5660	3120
Austenitic stainless Steel, 347	5740	3090
Austenitic stainless Tin	3320	1670
Polyethylene High Density – HDPE	2460	750
Polyethylene Low Density – LDPE	2080	570
Water (20°C)	1480	-

Fuente: *Elaboración propia*

2.2.4.3 Ondas Superficiales

Estas ondas también son llamadas Rayleigh y, son un caso particular de la onda transversal. En este caso las ondas ultrasónicas se propagan únicamente en la superficie plana o curva de un sólido siguiendo su contorno e irregularidades.

Estas ondas se reflejan ante la existencia en su recorrido de aristas vivas o curvas con un radio inferior a una longitud de onda, también son interrumpidas, cuando encuentran gotas de aceite o suciedad [1].

Para un mismo material, la velocidad de propagación de estas ondas es ligeramente menor que la velocidad de la onda transversal (0.9),

sin embargo, esta velocidad depende del estado tensional al cual está sometida la superficie; con la tracción aumenta, mientras que la compresión, la disminuye.

2.2.4.4 Ondas Lamb

Este tipo de ondas se obtienen en materiales muy delgados, cuyo espesor es del orden de la longitud de onda como, por ejemplo, láminas y tubos.

Cuando se transmite la onda ultrasónica vibra todo el material en conjunto propagándose paralelamente a su superficie y en la dirección del impulso recibido. De estas ondas existen dos tipos: las simétricas de compresión (Figura 5) y las asimétricas de flexión (Figura 6). En los dos casos el movimiento de las partículas es elíptico.

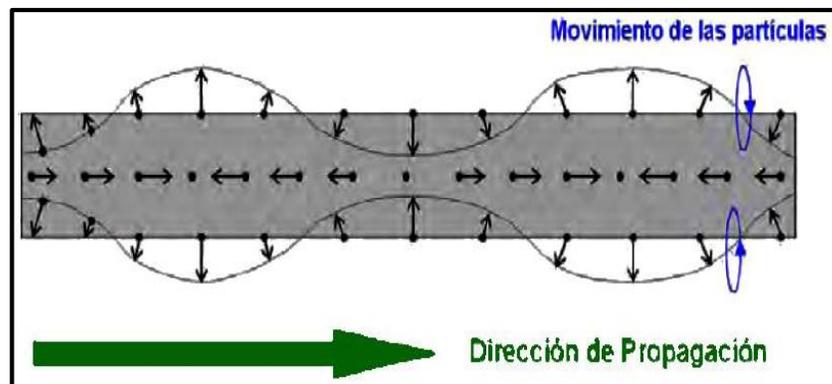


Figura 5.- Onda Lamb simétrica o de compresión

La velocidad de este tipo de onda no se considera como constante del material, ya que depende del espesor de la pared, del modo de onda y de la frecuencia.

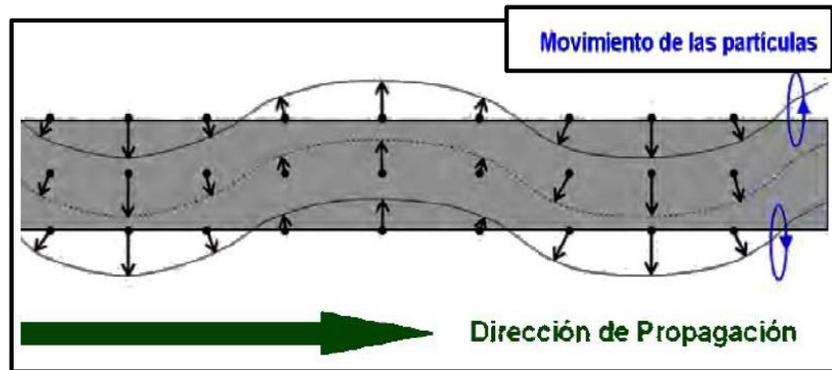


Figura 6.- Onda Lamb asimétrica o de flexión

2.2.4.5 Ondas de Borde

Éstas son las que se producen por difracción, cuando un haz ultrasónico incide sobre el borde de una discontinuidad y desvía las ondas alrededor de los bordes y esquinas en diferentes direcciones.

En esta técnica en particular, estas ondas serán las que nos determinen la presencia o no de defectos en la pieza de inspección.

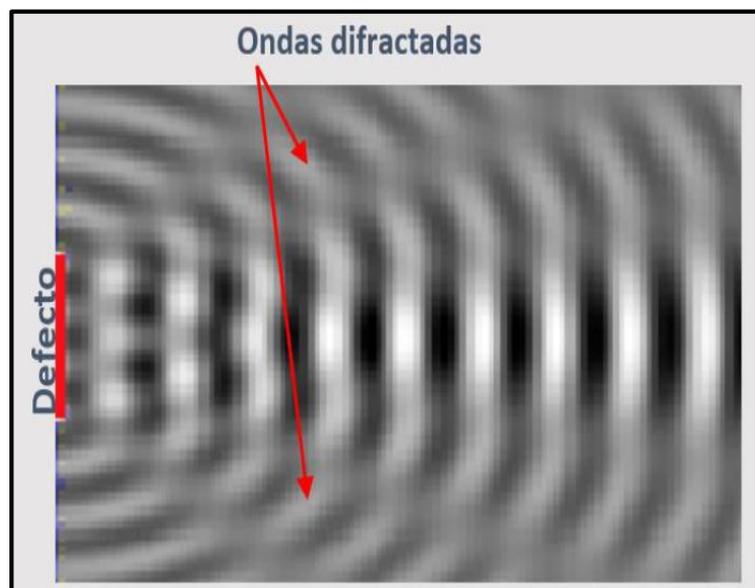


Figura 7.- Ondas de borde producido por defecto

2.2.5 Conversión de Ondas Ultrasónicas

Los ultrasonidos aplicados a los END para el estudio de diferentes materiales no se realizan sobre medios ilimitados (sin fronteras); la mayoría de los casos, los materiales poseen contornos o están interactuando físicamente con otros, por lo tanto, es importante conocer el comportamiento de las ondas mecánicas cuando atraviesan dichas uniones porque la propagación ultrasónica se altera.

La propagación de las ondas acústicas a través de una frontera, entre un material y otro, experimentan alteraciones en su dirección, intensidad y modo de vibración. El límite o frontera entre medios se denomina interface y la forma de incidir sobre ella puede ser perpendicular u oblicua.

2.2.5.1 Incidencia Perpendicular o Normal

Para el caso cuando las ondas inciden (I_i) de forma perpendicular en la interface de los dos medios, una parte de su energía es reflejada (I_r) y otra transmitida (I_t) con la misma dirección y sentido; además, la ley de la conservación de la energía se aplica en este caso, es decir; que la suma de la intensidad de la onda reflejada y la transmitida, es equivalente a la intensidad de la onda incidente. Ver figura 8.

$$I_i = I_r + I_t \quad (10)$$

Para el cálculo del coeficiente de reflexión (R) y transmisión (T) se emplean las siguientes fórmulas:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (11)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (12)$$

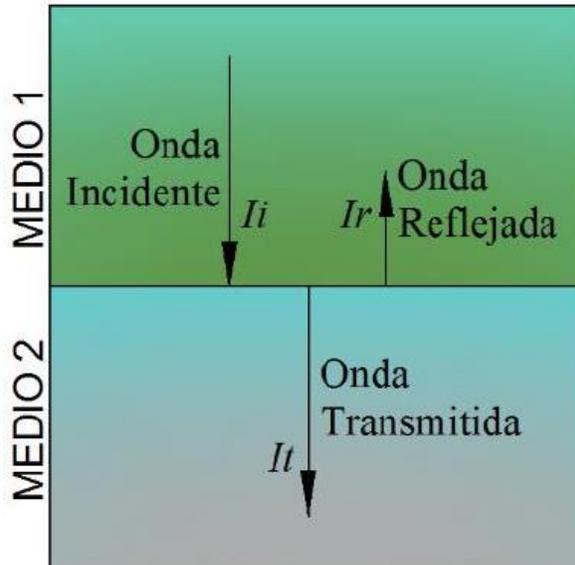


Figura 8.- Incidencia perpendicular de las ondas

Cuando se refiere a Intensidades Acústicas, no es de importancia el lado de la superficie límite por el que incide la onda (ya sea por el medio 1 o por el medio 2), los porcentajes de trasmisión y reflexión no cambian al permutarse entre si la las impedancias [1].

Para el caso de las presiones acústicas, la presión reflejada (P_r) es de la misma amplitud que la incidente (P_i) e independiente de la secuencia de los materiales. Sin embargo, la presión trasmitida depende de la secuencia de los materiales y es de diferente amplitud que la

incidente [3]. El balance de las presiones en la interface se muestra en la siguiente fórmula.

$$P_t = P_i + P_r \quad (13)$$

Para el cálculo de los coeficientes de presión reflejada (R') y transmitida (T'), se emplean las siguientes expresiones:

$$R' = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (14)$$

$$T' = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (15)$$

De estas fórmulas se deduce que la presión acústica reflejada es del mismo porcentaje o amplitud, sin importar el lado por el que se incide la onda.

2.2.5.2 Incidencia Angular u Oblicua

Cuando la onda incide con un determinado ángulo (α_i) respecto a la normal sobre una interface entre los dos medios de diferentes impedancias; una parte de la onda se refleja y otra se transmite al segundo medio, produciéndose el fenómeno de la refracción, en donde el haz transmitido cambia su dirección de propagación. Ver figura 9.

Los ángulos de reflexión (α_r) y refracción o transmitida (α_t) dependen directamente del ángulo de incidencia y de la velocidad de

propagación del sonido en los materiales, y éstos se pueden relacionar mediante la ley de Snell, en forma análoga a lo que ocurre en óptica.

$$\frac{\text{Sen}\alpha_i}{c_1} = \frac{\text{Sen}\alpha_r}{c_1} = \frac{\text{Sen}\alpha_t}{c_2} \quad (16)$$

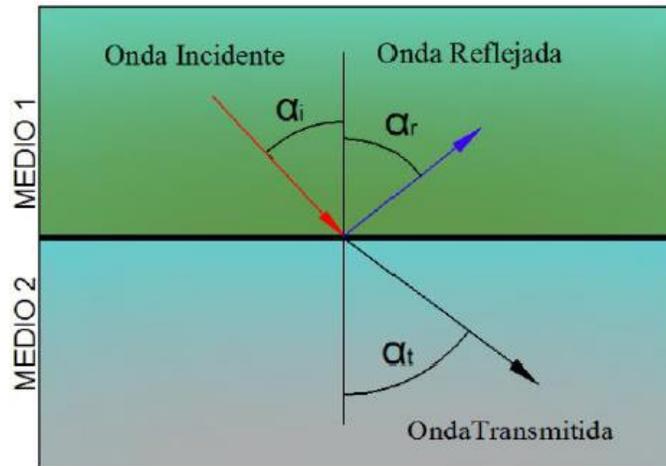


Figura 9.- Incidencia angular de las ondas

En acústica, además de los fenómenos descritos, independientemente de que la onda incidente sea longitudinal o transversal, aparece un desdoblamiento de la misma, originando dos ondas reflejadas y dos ondas refractadas, para cada caso, una de tipo longitudinal y otra transversal, esto es lo que se conoce como cambio de modos.

Aplicando nuevamente la ley de Snell, tenemos:

$$\frac{\text{Sen}\alpha_{iL}}{c_{L1}} = \frac{\text{Sen}\alpha_{rL}}{c_{L1}} = \frac{\text{Sen}\alpha_{rT}}{c_{T1}} = \frac{\text{Sen}\alpha_{tL}}{c_{L2}} = \frac{\text{Sen}\alpha_{tT}}{c_{T2}} \quad (17)$$

De las igualdades anteriores (17) y analizando las Figura 10, se pueden deducir las siguientes conclusiones [3]:

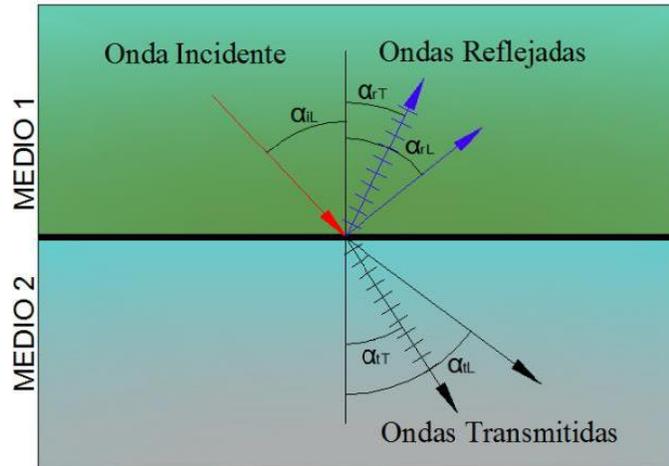


Figura 10.- Reflexión y refracción de onda con incidencia angular

a).- Si la onda incidente y la reflejada son del mismo tipo, éstas formarán el mismo ángulo con la normal a la interface, puesto que para el mismo medio, tienen una idéntica velocidad acústica ($\alpha_{iL} = \alpha_{rL}$; $\alpha_{iT} = \alpha_{rT}$).

b).- Para un mismo medio, la velocidad de la onda longitudinal es casi el doble de la trasversal; por lo tanto, los ángulos de reflexión o de refracción de las ondas longitudinales serán mayores que los correspondientes ángulos de las ondas trasversales. Para el caso de la técnica TOFD, se emplean mayormente las velocidades longitudinales, por lo que no se busca eliminarlas en todos los casos ($\alpha_{rL} > \alpha_{rT}$; $\alpha_{tL} > \alpha_{tT}$).

c).- Para simplificar el ensayo de materiales, sobre todo en soldadura [1], nos interesa desaparecer de forma aislada la onda longitudinal que se refracta en el medio 2, de forma que se transmita

únicamente la onda transversal. Esto sucede variando el ángulo de incidencia para lograr que el ángulo de refracción de la onda longitudinal sea mayor o igual que 90° . La condición límite para conseguir este efecto se consigue considerando $\alpha_L=90^\circ$, obteniendo así el primer ángulo de incidencia crítico (18), siempre que se cumpla $C_{L1} \leq C_{L2}$.

$$\text{Sen}\alpha_{iL} = \frac{C_{L1}}{C_{L2}} \quad (18)$$

d).- Si se continúa incrementando el ángulo de incidencia, también se puede lograr desaparecer la onda transversal transmitida en el medio 2, obteniendo una reflexión total de la onda incidente. Para determinar el segundo ángulo crítico (19) se considera $\alpha_T=90^\circ$, siempre que se cumpla $C_{L1} \leq C_{T2}$.

$$\text{Sen}\alpha_{iT} = \frac{C_{L1}}{C_{T2}} \quad (19)$$

Resumiendo, en la Figura 11 se representa genéricamente el comportamiento de las ondas refractadas cuando se varía el ángulo de incidencia, en ésta se logra identificar la existencia de los dos ángulos críticos. Estos ángulos dependen de la velocidad de propagación de las ondas en cada material.

Cuando se intercala entre los materiales, un medio de acoplamiento o cuña acústicamente conductora, se sigue verificando la ley

de Snell entre el primer material y el tercero, aunque se produce un pequeño desplazamiento paralelo de la onda. [4]

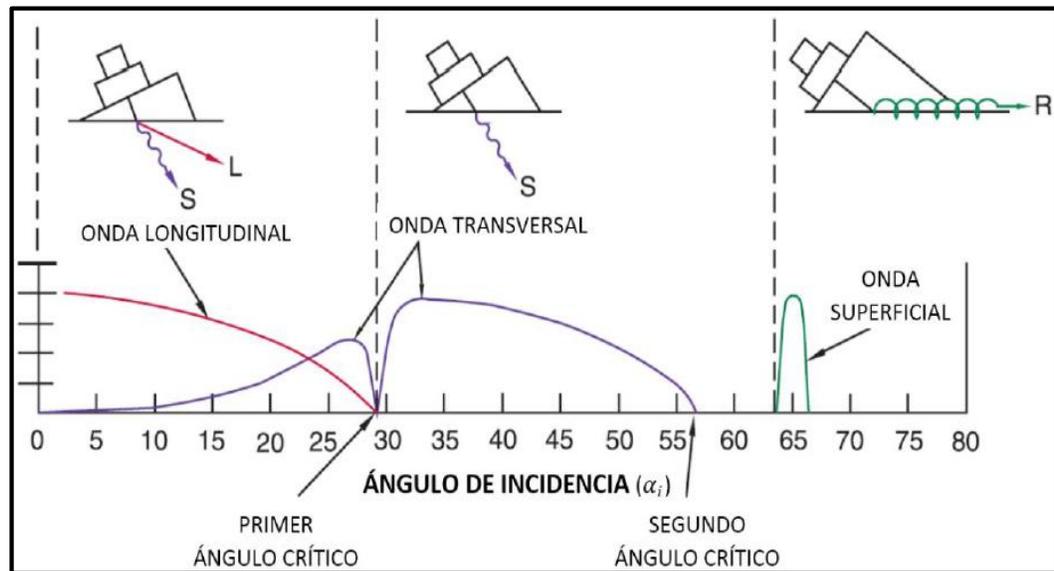


Figura 11.- Ángulos críticos de refracción de un material

2.2.6 Generación de Ondas Ultrasónicas

En los ensayos no destructivos para la inspección de cuerpos sólidos, lo más usual es el uso de los osciladores piezoeléctricos, donde se aprovecha el fenómeno de la piezoelectricidad de sus elementos para la generación de ondas ultrasónicas.

Estos dispositivos pueden convertir una forma de energía en otra. En el caso de los transductores ultrasónicos, cuando éstos funcionan como emisores, convierten la energía eléctrica en ondas mecánicas y, en cambio cuando funcionan como receptores, las ondas mecánicas incidentes son convertidas en energía eléctrica.

Estos generadores de ondas ultrasónicas reciben diferentes denominaciones, pudiendo ser; transductores, palpadores u osciladores, en cualquier caso se refieren al mismo elemento.

2.2.6.1 Elementos de un Transductor

Las partes principales de un transductor ultrasónico utilizado en los ensayos no destructivos son los siguientes: Elemento activo o piezoeléctrico, backing o contra masa y capa de acoplamiento [5], éstos se pueden apreciar en la siguiente Figura 12.

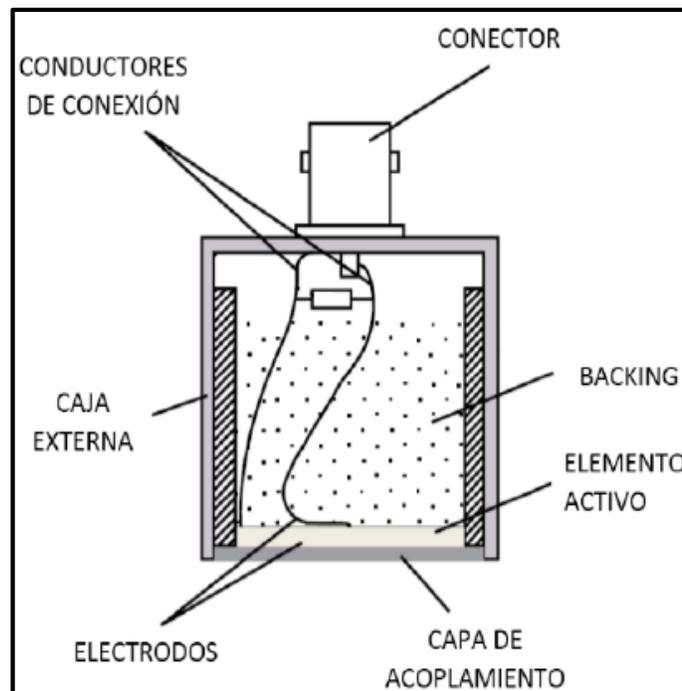


Figura 12.- Esquema y partes de un Transductor de Ultrasonido

a).- El elemento activo, está construido de una cerámica piezoeléctrica, compuesto o polímero y es el encargado de realizar la conversión eléctrica-mecánica. Éste es conectado eléctricamente al

exterior a través de las terminales soldadas a los electrodos que cubren el elemento piezoeléctrico.

En la actualidad, los materiales mayormente utilizados como elemento activo en los transductores son las cerámicas Titanato Zirconato de Plomo (PZT), éstas poseen una mayor flexibilidad de formato y de propiedades piezoeléctricas, ya que son fabricadas por la sinterización de polvos cerámicos.

Presentan una alta sensibilidad, siendo ideales para la transmisión y recepción en dispositivos de baja potencia.

b).- Backing o contra masa, es un sistema mecánico pasivo de alta impedancia acústica, colocado en la cara posterior del elemento activo y tiene como objetivo fundamental, absorber la energía mecánica en esa dirección y detener la oscilación del elemento piezoeléctrico. Por lo tanto, en un transductor se generan ondas en un solo sentido y a mayor resolución.

c).- La capa de acoplamiento, tienen dos funciones, proteger el elemento activo y asegurar una mayor transferencia de energía.

2.2.6.2 Tipos de Transductores

Existen una gran variedad de transductores ultrasónicos utilizados en aplicaciones de detección de fallas, tanto para ensayos de campo y de

laboratorio. En forma general, se pueden clasificar en tres grupos; de contacto, de haz angular y los de inmersión.

a).- Transductores de contacto, éstos están diseñados para usos generales en la inspección ultrasónica manual y automático, donde los materiales de prueba son relativamente planos y uniformes. Proporcionan una alta sensibilidad para una mejor penetración y se fabrican con diseños resistentes para condiciones extremas de trabajo.

b).- Transductores de haz angular, éstos son de elemento sencillo o doble que permiten que el haz ultrasónico sea introducido en el material de prueba con un ángulo determinado. Los usos más comunes de este tipo están en las inspecciones de soldaduras.

c).- Transductores de inmersión, generan ondas longitudinales y son usados típicamente en sistemas de barrido manual y automático. Se los utiliza para barridos de piezas con geometrías irregulares y complejas, para ello se utiliza una columna de agua como medio de acople entre el transductor y la pieza inspeccionada.

En cualquiera de los casos anteriores, los transductores pueden estar contruidos por uno o varios elementos piezoeléctricos colocados en un mismo cabezal.

2.2.7 Características de los Transductores

Los transductores de ultrasonidos para END, normalmente son caracterizados por sus propios fabricantes de acuerdo con los procedimientos estándares, tales como la norma ASTM E1065, donde la sensibilidad del transductor, la forma de onda y, el espectro de frecuencia se pone a prueba y son documentados en sus respectivas hojas técnicas.

2.2.7.1 Haz y Campo Ultrasónico

El haz ultrasónico está constituido por el conjunto de vibraciones cónicas, que partiendo del foco generador (cristal piezoeléctrico) del transductor, produce compresiones y dilataciones periódicas (máximos y mínimos de presión acústica) en el material y se transmite a través de ella con una velocidad determinada.

El espacio por el que atraviesa y se propaga el haz, es el campo ultrasónico. Éste se divide en función de las características que presentan las ondas acústicas. En el caso ideal, sin interacciones ni reflexiones originados por defectos, el campo estaría dividido en tres zonas:

Zona de campo cercano: $0 \leq z \leq N$

Zona de campo transitorio: $N \leq z \leq 3N$

Zona de campo lejano: $z \geq 3N$

El campo cercano (Figura 13) tiene una distribución muy irregular y en él aparecen picos de gran intensidad junto a otras zonas casi nulas. Estas variaciones de intensidad dificultan la detección de

heterogeneidades en esa zona, porque se producen interferencias múltiples y sus amplitudes cambian en función de la distancia del reflector al transductor.

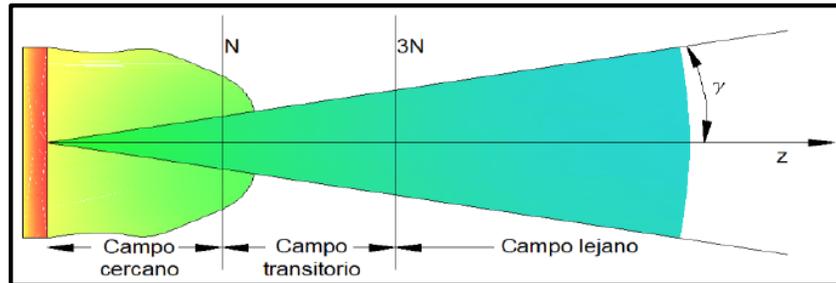


Figura 13.- Haz ultrasónico de un transductor

En la dirección de propagación de la onda, el último máximo de presión acústica determina el final del campo próximo. Para calcular la longitud de este campo, se utiliza la siguiente expresión:

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (20)$$

Dónde:

N = Longitud del campo próximo (m).

D = Diámetro del transductor (m).

λ = Longitud de onda (m).

Analizando la fórmula anterior, podemos concluir que la longitud del campo próximo depende del área del transductor y de la longitud de onda formada y, esta última variable a su vez, tiene dependencia de la frecuencia y la velocidad de propagación propia de cada material, lo cual

nos dice: Un mismo oscilador para diferentes materiales tiene distintos valores de campo próximo.

Si aplicamos la expresión (20) se obtienen los diferentes valores de campo próximo para los transductores que se utilizarán en este trabajo. Esos resultados están detallados en la Tabla 2.

A continuación del campo próximo se encuentra la zona de campo lejano, que se denomina también foco natural, porque ahí se produce la divergencia del haz e inicia la apertura del ángulo γ , ver Figura 13.

Tabla 2
Valores de campo próximo (mm) de los transductores empleados en la técnica TOFD

Tipos de Ondas		Ondas Longitudinales			Ondas Transversales		
Frecuencia MHz		2.5	3.5	5	2.5	3.5	5
Material		Acero					
Velocidad Acústica (m/s)		5920			3230		
Longitud de Onda (m)		0.002368	0.001691	0.001184	0.001292	0.000923	0.000646
Diámetro (mm)	6	3	5	7	7	10	14
	10	10	14	21	19	27	39
Material		HDPE					
Velocidad Acústica (m/s)		2460			750		
Longitud de Onda (m)		0.000984	0.000703	0.000492	0.000300	0.000214	0.000150
Diámetro (mm)	6	9	13	18	30	42	60
	10	25	35	51	83	117	167

Fuente: *Elaboración propia*

2.2.7.2 Divergencia del Haz

El ángulo γ de un transductor se obtiene mediante la expresión (21) y se comprueba que depende tanto de las dimensiones del elemento emisor como de la longitud de onda del ultrasonido emitido.

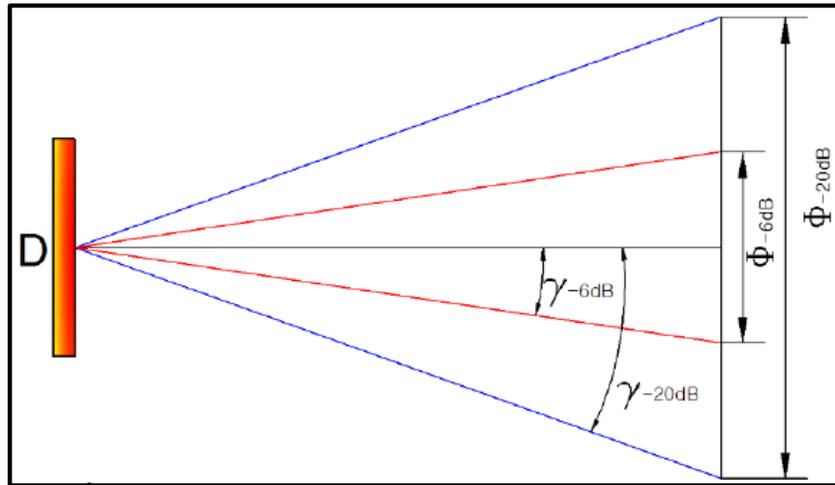


Figura 14.- Ángulo total de divergencia para diferentes límites de atenuación

$$\gamma_{(\Delta dB)} = \text{Sen}^{-1} \left(K \frac{\lambda}{D} \right) = \text{Sen}^{-1} \left(K \frac{C}{Df} \right) \quad (21)$$

La constante K varía en función del valor de atenuación que se toma como referencia para considerar los lados respectivos del ángulo de divergencia del haz. En la siguiente tabla están expresados los valores más usados dentro de los END [6].

Tabla 3
Constante K para el cálculo del ángulo de divergencia

Valor de Atenuación (ΔdB)	K
-3	0.51
-6	0.7
-10	0.87
-24	1.09

Fuente: *Elaboración propia*

En la Tabla 4, se han calculado los ángulos de divergencia para el HDPE, con transductores de 10 mm de diámetro (usados en este trabajo) y diferentes frecuencias ultrasónicas de diseño.

Tabla 4
Ángulo de divergencia en HDPE para diferentes límites de atenuación

Material	HDPE								
Frecuencia MHz	2.5	3.5	5	2.5	3.5	5	2.5	3.5	5
Límite de Referencia	γ (-6dB)			γ (-10dB)			γ (-24dB)		
K	0.7			0.87			1.09		
Ángulo para Ondas Longitudinales $C_L = 2460$ m/s									
Diámetro mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	4	3	2	5	4	2	6	4	3
Ángulo para Ondas Transversales $C_T = 750$ m/s									
Diámetro mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1	1	1	1	1	1	2	1	1

Fuente: *Elaboración propia*

El ángulo total de divergencia (22) del haz sobre el material corresponde al doble del valor calculado en la tabla anterior y su representación estuvo dada en la Figura 14.

$$\Phi_{(\Delta dB)} = 2\gamma_{(\Delta dB)} \quad (22)$$

Si analizamos la ecuación (21) y los resultados de la tabla anterior, se puede llegar a la conclusión de que el ángulo de divergencia del haz, es directamente proporcional a la velocidad e inversamente a la frecuencia. Es muy importante tener en cuenta en este trabajo, que el uso de ondas transversales, reducen aproximadamente a la mitad el ángulo de abertura del haz, por lo cual, la focalización sobre el área de inspección será menor que si se lo hiciera con ondas longitudinales.

Además, a medida que incrementamos la frecuencia, el ángulo de divergencia se va reduciendo y por ende el área focalizada será cada vez menor.

2.2.7.3 Longitud de Pulso de un Transductor

Para determinar la longitud de pulso generado por un transductor se utiliza la señal de radio frecuencia de la Figura 15 y según la norma ASTM E1065, se seleccionan los picos de máxima amplitud, tanto de valores positivos como negativos de los ciclos, que a partir de ellos y con la ecuación (23), se trazan líneas horizontales en los valores correspondientes a la caída de -20dB. Por lo tanto, la longitud pulso generado serán todas las ondas que superan estas líneas horizontales.

$$\Delta dB = 20 \log_{10} \frac{A_1}{A_2} \quad (23)$$

Dónde:

ΔdB = Variación de decibelios.

A_1, A_2 = Amplitud inicial y final respectivamente.

De la Figura 15 se puede extraer información adicional como: amplitud pico a pico, $V_{pp}=700\text{mV}$; duración de pulso, $\Delta t_{-20\text{dB}}=3.25\mu\text{s}$; número de picos, $PN=10$ y número de ciclos completos, $CN=5$ [6].

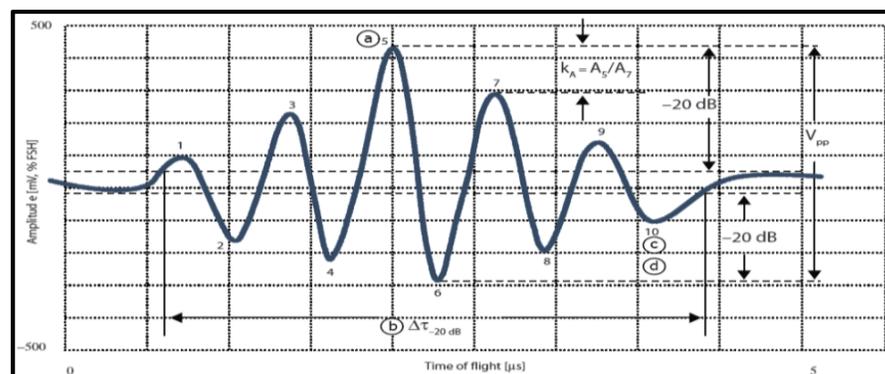


Figura 15.- Longitud de pulso ultrasónico según la norma ASTM E1065

Si esta señal es convertida a su contenido en frecuencia correspondiente usando la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés), se puede determinar las características del transductor en función de su espectro como por ejemplo el ancho de banda.

2.2.7.4 Ancho de Banda de un transductor

Teóricamente un transductor que genera una onda ultrasónica continua lo hace a su frecuencia de diseño, que coincide con su frecuencia de resonancia. Para el caso de las técnicas empleadas en ensayos no destructivos, se utiliza pulsos ultrasónicos de determinada longitud, llegando a tener una amplia banda alrededor de la frecuencia de diseño, esto debido a la dificultad para iniciar y detener el pulso.

Por lo general, cuando menos ciclos completos (CN) contengan el pulso, más contenido en frecuencia tendrá.

El ancho de banda (BW por sus siglas en inglés) corresponde el rango de frecuencias que contiene un pulso ultrasónico generado. En la Figura 16 se puede observar el contenido en frecuencia y como éste abarca un espectro a cada lado de la frecuencia del diseño del transductor. El ancho de banda relativo (BWr) estará dado por la expresión (24), donde f_L y f_U corresponden a los límites tanto inferiores como superiores del espectro donde la amplitud cae por debajo de -6dB de atenuación. El valor de f_P representa el valor pico y f_C la frecuencia central que es calculado por la media aritmética de los límites.

$$BWr_{-6dB} = \frac{f_U - f_L}{f_c} 100\% \quad (24)$$

$$f_c = \frac{f_U + f_L}{2} \quad (25)$$

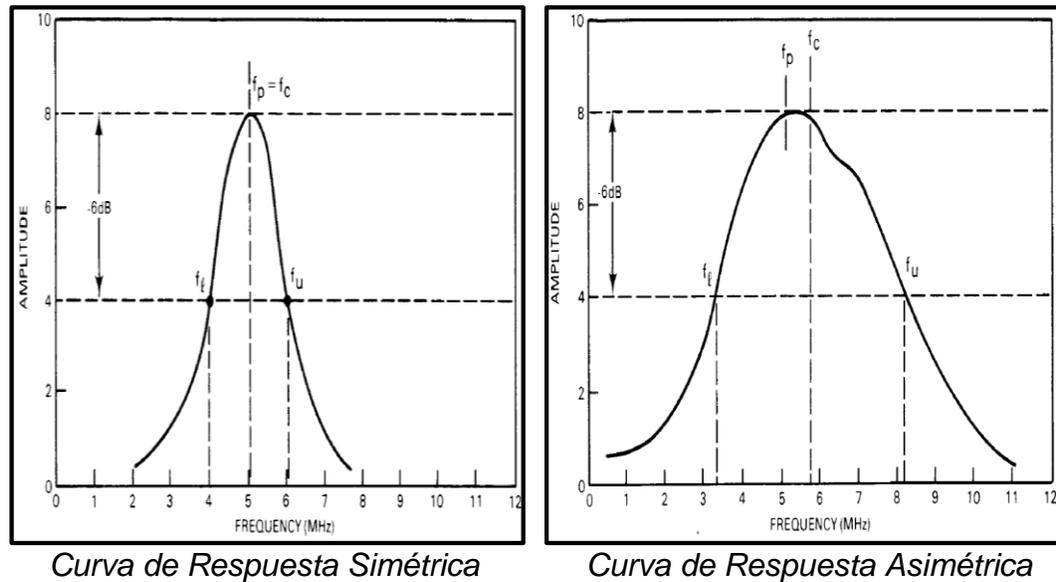


Figura 16.- Representación espectral del ancho de banda de un transductor ultrasónico según la norma ASTM E1065

Analizando los dos apartados anteriores se puede determinar que el ancho de banda estará determinado por la longitud de onda generada y, esta última a su vez dependerá del tiempo que dure la excitación sobre el transductor.

De acuerdo con el fabricante de transductores Olympus [6], en la Figura 17, se puede apreciar una clasificación, tanto del tipo de onda generada como del espectro correspondiente. [4]

Según este fabricante, con los valores de longitud de pulso ($\Delta\tau$) y ancho de banda (BW) descritos, los pulsos de BW estrecho mejoran la detección y los BW anchos en cambio son empleados para el dimensionamiento de los defectos. Recalca finalmente, que estas directrices están dadas para materiales ferríticos y similares; para una incidencia normal del transductor; y están condicionados por la morfología y orientación de los defectos.

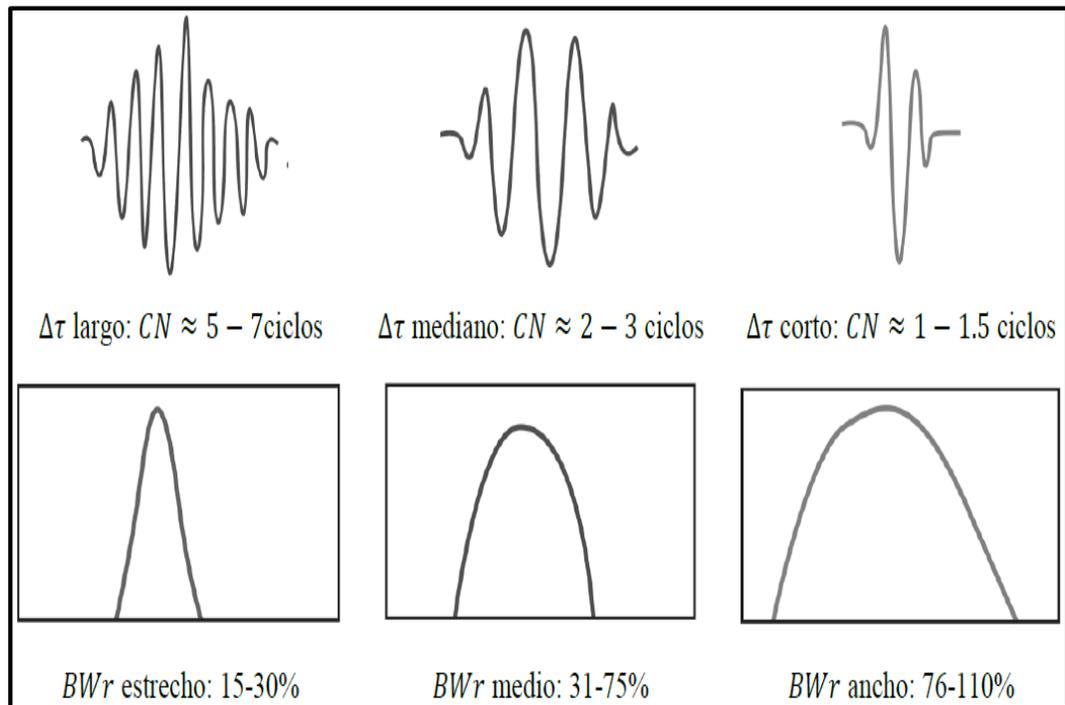


Figura 17.- Clasificación de transductores según el ancho de banda relativo

En la técnica TOFD, el tipo de onda generado por el transductor debe tener una longitud de pulso reducido, con un número de ciclos completos alrededor de 1 a 1.5, es decir que su contenido de frecuencia es ancho.

2.2.8 Tiempo de Vuelo de Difracción (TOFD)

Esta es una tecnología nueva de imágenes ultrasónicas, empleada para la inspección no destructiva de defectos en soldaduras y otras aplicaciones. Esta técnica tuvo su origen a partir de los estudios publicados por Silk and Liddington en 1975, y su desarrollo se debió a la necesidad de determinar y registrar el tamaño real de un defecto. Para conseguir este objetivo, se emplea el fenómeno de la difracción de las ondas incidentes en los bordes de un fallo.

A diferencia de la técnica Pulso-Eco, que mide la atenuación de la onda reflejada para tener un tamaño aproximado del defecto, la técnica TOFD utiliza la técnica Emisor-Receptor, que mide las diferencias de tiempo captadas de las señales difractadas por los bordes del defecto para dimensionar su tamaño, de ahí el significado de su nombre, que indica la medición del tiempo de vuelo y/o retardo de la onda difracta.

Esta técnica actualmente tiene un gran desarrollo y aceptación frente a otro tipo de tecnologías convencionales como la radiografía o gammagrafía, debido a su bajo costo y tiempos empleados en las inspecciones. Otro impulso que ha motivado su desarrollo es la adopción de nuevas normativas y códigos tales como el ASME Code Case 2235-4, que sustituye el ensayo radiográfico por el ultrasónico de soldaduras en la fabricación de componentes de calderas, recipientes a presión entre otros; y además, con la necesidad de eludir los problemas implícitos de seguridad y salud que conlleva el uso de materiales y equipos radioactivos.

2.2.8.1 Configuración de la Técnica TOFD

Esta técnica emplea dos transductores de incidencia angular, uno trabajando en transmisión y otro en recepción, enfrentados a una cierta distancia. Un esquema general de la disposición de los palpadores sobre la pieza de ensayo está representado en la Figura 18. En esta imagen se observa la trayectoria de las diferentes ondas que son registradas por el receptor (Rx) ante una única fuente de emisión (Tx).

Esta técnica mide los diferentes tiempos de vuelo que toma la onda en llegar al receptor. El tipo de ondas mayormente utilizadas son las longitudinales (llamadas también de compresión), debido a que éstas tienen un alto coeficiente de difracción y una mayor rapidez de propagación dentro del material que las ondas transversales. Sin embargo, éstas últimas se emplean en casos particulares como en la inspección de materiales de pequeños espesores donde interesa incrementar la resolución del defecto, así como detectar aquellas discontinuidades que se encuentran muy cerca de la superficie de inspección [7].

La técnica TOFD se identifica por el empleo de una imagen bidimensional similar a la Figura 19, en la cual se visualiza y caracteriza las discontinuidades y/o defectos que pueda tener el material inspeccionado.

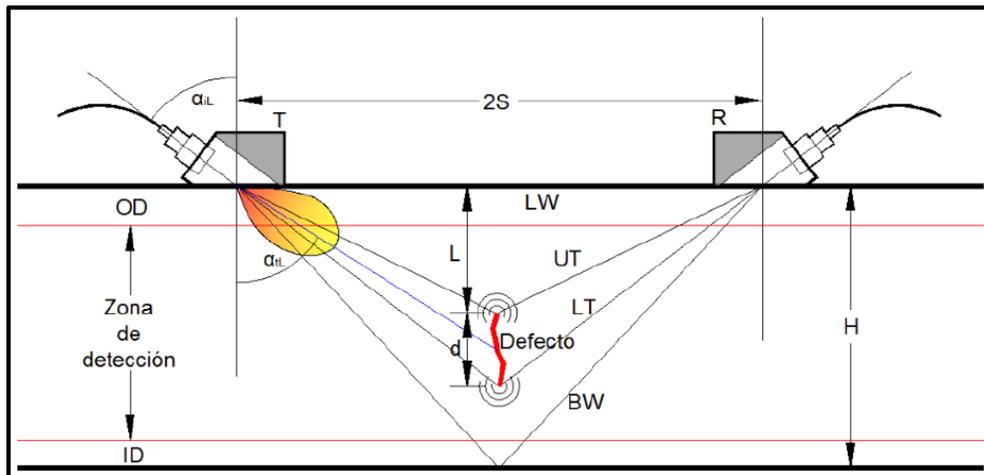


Figura 18.- Configuración general de la técnica TOFD

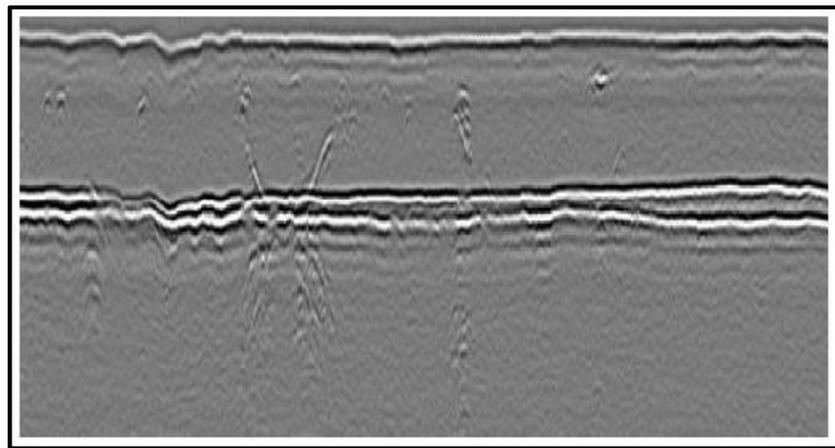


Figura 19.- Ejemplo de una imagen bidimensional con la técnica TOFD

Estas imágenes bidimensionales reciben el nombre de B-Scan que está conformada por un elevado número de trazas temporales denominadas A-Scan. En la Figura 20 se muestra el proceso para la obtención de esta imagen a partir de las trazas temporales registradas por el transductor receptor, para ello es necesario el desplazamiento sincronizado de los palpadores paralelos al eje de inspección, estos A-Scan deben ser tomadas cada milímetro de recorrido.

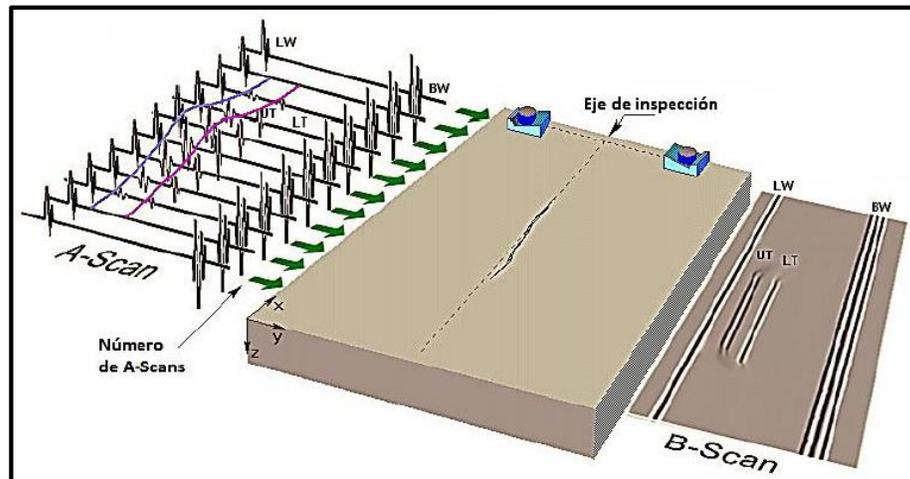


Figura 20.- Proceso de formación de un B-Scan con la técnica TOFD

En algunas citas bibliográficas relacionadas con esta técnica también las denominan D-Scan.

2.2.8.2 Parámetros de la Técnica TOFD

Para el presente trabajo conviene adoptar una nomenclatura adecuada e identificar las variables físicas de una configuración TOFD. En algunos casos estas variables son identificadas con abreviaturas derivadas del inglés influenciados por las referencias bibliográficas consultadas y, en otros casos por conveniencia propia; por lo tanto, en este apartado se detallan cada una de las variables intrínsecas a esta técnica y las fórmulas características para su estimación cuantitativa.

En este trabajo, para la explicación de los parámetros y dimensiones de la técnica, se hace referencia a las ondas longitudinales (L), ya que el uso de las transversales (S o T) se limita a la técnica de Pulso-eco, mientras que las ondas longitudinales utilizan la técnica Emisor-

Receptor, debido a que éstas tienen un alto coeficiente de difracción y una mayor rapidez de propagación dentro del material que las ondas transversales.

En la Figura 18 se observa que se necesitan mínimo un par de transductores, considerando que en otras variables de la técnica TOFD se emplean más de un par de transductores. (Tx y Rx) enfrentados entre sí, a una distancia de separación ($2S$), medido entre los puntos de incidencia de los haces sobre la probeta.

En este caso, se considera la existencia de un solo defecto en el material de prueba, y al emitirse ondas ultrasónicas por parte del transductor transmisor sobre la pieza, son cuatro los pulsos que se registrarían a diferentes tiempos de vuelo en el receptor. La primera de ellas es la onda lateral (LW), que es una onda longitudinal que viaja en una trayectoria muy cerca de la superficie de la probeta y es la primera en captarse en el receptor; la onda longitudinal que más tarde llega al receptor corresponde al eco de fondo (BW) y entre estas dos ondas características se observan las trayectorias que tomarían los pulsos difractados en los bordes superior e inferior del defecto y, como es de esperar, el tiempo en que son registrados por el receptor estarían comprendidos entre la onda lateral y la proveniente del fondo de la probeta.

2.2.8.3 Trayectoria de Ondas Acústicas

Para el cálculo de la trayectoria del eco de fondo se emplea la siguiente expresión.

$$BW = \sqrt{4H^2 + (2S)^2} \quad (26)$$

Dónde:

BW = Trayectoria del eco de fondo (mm).

H = Espesor del material (mm).

2S = Distancia de separación, entre los puntos de incidencia de los transductores (mm).

Las ondas difractadas por el defecto se denominarán: onda de borde superior (UT) y onda de borde inferior (LT), donde sus trayectorias dependerán tanto de la posición relativa del defecto entre los dos transductores como de su inclinación. Si suponemos el caso de la Figura 18, con el defecto en el centro de los transductores a una profundidad (L), en posición vertical y con una longitud (d) de la discontinuidad, se pueden estimar las trayectorias con las siguientes expresiones.

$$UT = \sqrt{4L^2 + (2S)^2} \quad (27)$$

$$LT = \sqrt{4(L + d)^2 + (2S)^2} \quad (28)$$

Dónde:

UT = Onda de borde superior (mm).

LT = Onda de borde inferior (mm).

L = Profundidad de defecto, posición vertical (mm).

d = Longitud de discontinuidad (mm).

2.2.8.4 Tiempos de Vuelo

Conociendo la velocidad C_L de la probeta inspeccionada así como las trayectorias correspondientes, se pueden calcular los diferentes tiempos de vuelo de cada una de las ondas descritas, mediante siguientes las expresiones:

$$t_{LW} = \frac{LW}{C_L} \quad (29)$$

$$t_{BW} = \frac{BW}{C_L} \quad (30)$$

$$t_{UT} = \frac{UT}{C_L} \quad (31)$$

$$t_{LT} = \frac{LT}{C_L} \quad (32)$$

Dónde:

t_{LW} = Tiempo de vuelo de onda lateral (s).

t_{BW} = Tiempo de vuelo de eco de fondo (s).

t_{UT} = Tiempo de vuelo de onda de borde superior (s).

t_{LT} = Tiempo de vuelo de onda de borde inferior (s).

Estos tiempos calculados están representados en la Figura 21 y corresponden a ondas longitudinales.

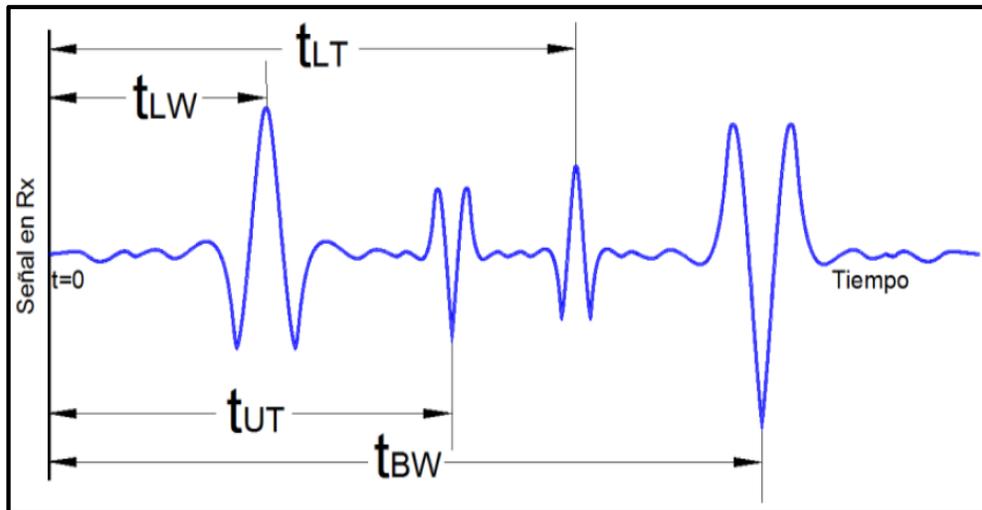


Figura 21.- Señal temporal de la técnica TOFD con ondas longitudinales

En el A-Scan anterior se destaca un efecto: las ondas laterales presenta una fase invertida respecto a las reflejadas o ecos de fondo, así como también lo hacen las ondas difractadas, una respecto a la otra. Se debe considerar este fenómeno a la hora de dimensionar el defecto.

2.2.8.5 Ángulos de Refracción

El ángulo de refracción o transmisión de las onda longitudinales (α_{tL}) depende del tipo de material inspeccionado y de su correspondiente ángulo de incidencia (α_{iL}), este último puede ser variable en algunos transductores o fijo de acuerdo a la cuña de acople que se utilice y para su cálculo se emplean las ecuaciones de Snell (17) descritas anteriormente.

En esta técnica es conveniente conocer los ángulos de los ejes imaginarios con el cual los haces son transmitidos dentro de la probeta, con la finalidad de poderlos focalizar a la profundidad con mayor probabilidad de presentar discontinuidades y, así lograr una mejor detección y dimensionamiento de los defectos.

2.2.8.6 Zonas Muertas

Una de las desventajas de la técnica TOFD es que existen dos zonas muertas (Figura 18), la primera de ellas está cerca de la superficie superior (OD) y la segunda en la cara opuesta (ID) de la probeta de inspección, en estas zonas por lo general no se pueden llegar a dimensionar con exactitud el tamaño de los defectos, pero si detectarlos cuando estos están abiertos al exterior.

Es importante identificar la profundidad de estas zonas y la norma UNE EN 583-6 nos proporciona las expresiones (33) y (34) para su cálculo, teniendo en cuenta que el valor de t_p corresponde al tiempo de duración de la excitación del transductor y por ende la duración del pulso ultrasónico emitido y H el espesor del material de inspección.

$$OD = \frac{C^2 t_p^2}{4} + C S t_p^2 \quad (33)$$

$$ID = \sqrt{\left(\frac{C^2 (t_p + t_{BW})^2}{4} - S^2\right)} - H \quad (34)$$

Para cubrir estas zonas muertas se puede combinar la técnica TOFD con la de Pulso-Eco convencional [8].

Estas dos zonas muertas pueden ser reducidas mediante la disminución de la distancia 2S existente entre los dos transductores y, el empleo de tiempos más cortos de excitación del transductor [9].

2.2.8.7 Resolución Espacial

Ésta se define como el grado con el que los defectos (llamados difractores) próximos pueden distinguirse unos de otros. En la norma UNE EN 583-6 establece que este valor está en función de la profundidad de la probeta y puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$R = \sqrt{\left(\frac{C^2(t_l + t_p)^2}{4} - S^2\right)} - LR \quad (35)$$

Donde t_p es el tiempo de duración del pulso y t_l corresponde al tiempo de vuelo a la profundidad LR. Concluyendo que la resolución aumenta con la profundidad y se puede mejorar disminuyendo la distancia entre palpadores o la duración del pulso acústico [9].

2.3 Marco Conceptual

Tiempo de Vuelo de Difracción (TOFD): De sus siglas en inglés, Time Of Flight Diffraction, Esta es una tecnología nueva de imágenes ultrasónicas, empleada para la inspección no destructiva de defectos en soldaduras y otras aplicaciones.

Esta técnica tuvo su origen a partir de los estudios publicados por Silk and Liddington en 1975, y su desarrollo se debió a la necesidad de determinar y registrar el tamaño real de un defecto. Para conseguir este objetivo, se emplea el fenómeno de la difracción de las ondas incidentes en los bordes de un fallo.

Unión a Tope Termofusionada: La soldadura a tope es un sistema de unión que se aplica preferentemente en tuberías de PE 80 y PE 100 de media y alta densidad de diámetro mayor a 90 mm. Consiste en calentar los extremos de los tubos a unir por medio de una placa calefactora que esté a una temperatura de 210-225°C y a continuación se comunica una presión previamente tabulada para cada clase de tubo.

Ultrasonidos: Son ondas mecánicas, del mismo tipo que las ondas audibles y con frecuencias superiores al espectro auditivo del ser humano.

Ondas acústicas infrasónicas: Son frecuencias menores a 16 Hz y que no son percibidas por los seres humanos.

Ondas acústicas sónicas: Frecuencias comprendida en el rango de 16 Hz a 16 kHz, son las que puede percibir los seres humanos.

Ondas acústicas ultrasónicas: Frecuencias superiores a 20 kHz, no pueden ser percibidas por los seres humanos.

Frecuencia: Es el número de oscilaciones que realizan las partículas por cada unidad de tiempo.

Amplitud: Es la intensidad de la onda acústica correspondiente a la deflexión máxima de las partículas del medio de transmisión.

Longitud de onda: Es la distancia entre dos planos inmediatos de partículas que se encuentran en el mismo estado de movimiento.

Velocidad acústica: Es la rapidez con la que se propagan las ondas acústicas a través del medio.

Presión acústica: Diferencia entre la presión instantánea y la presión atmosférica estática, no solo ocurre en los gases, también en líquidos y sólidos.

Impedancia acústica: Es la relación entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibraciones de las partículas.

Energía acústica específica: Se define como la energía por unidad de volumen del medio cuando avanza con la velocidad acústica.

Intensidad acústica: Se define como la cantidad de energía que pasa por unidad de área y por unidad de tiempo.

Atenuación: Es la disminución de la amplitud de una oscilación en función del tiempo y se produce por la propia absorción de los ultrasonidos en el medio y la dispersión a causa de la falta de homogeneidad en la estructura de los materiales.

Ondas longitudinales: Este modo de vibración también conocido como ondas de compresión, se presentan en medios sólidos, líquidos y gaseosos. Este tipo de

onda se caracteriza por la oscilación de las partículas en la misma dirección que el sentido de propagación de la onda.

Ondas transversales: También conocidas como ondas de corte o de cizalladura, estas se generan únicamente en los materiales sólidos, ya que los medios líquidos y gaseosos no tienen enlaces elásticos transversales imposibilitando que las vibraciones de las partículas sean transmitidas a las contiguas. La generación de estas ondas aparece cuando se aplica en un extremo del material sólido, una fuerza cortante y periódica, que provoca una vibración de las partículas que es perpendicular al sentido de propagación de las ondas.

Ondas superficiales: Estas ondas también son llamadas Rayleigh, son un caso partículas de la onda transversal. En este caso las ondas ultrasónicas se propagan únicamente en la superficie plana o curva de un sólido siguiendo su contorno e irregularidad.

Ondas lamb: Este tipo de onda se obtiene en materiales muy delgados, cuyo espesor es del orden de la longitud de onda.

Ondas de borde: Éstas son las que producen por la difracción, cuando un haz ultrasónico incide sobre el borde de una discontinuidad y desvía las ondas alrededor de los bordes y esquinas en diferentes direcciones.

Transductor: es un dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente a la salida.

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

Junta: La unión de los miembros o los bordes de los miembros que van a ser unidas o se han unido.

Junta de penetración completa (CJP): Condición de soldadura en la cual se extiende a través del espesor de la junta.

Indicación: Respuesta o evidencia de una discontinuidad resultante de la aplicación de un ensayo no destructivo.

Discontinuidad: Falta de continuidad; falta de cohesión (de unión); interrupción en la estructura física normal del material o producto. Una interrupción de la estructura típica de un material, tal como una falta de homogeneidad en sus características mecánicas, metalúrgicas o físicas. Una discontinuidad no es necesariamente un defecto.

Defecto: Discontinuidad cuyo tamaño, forma, orientación, ubicación o propiedades son inadmisibles para alguna norma específica.

Porosidad: Es una discontinuidad, típicamente es una cavidad, formada por atrapamiento de gas durante la solidificación de la soldadura.

Fusión incompleta: Es una discontinuidad de soldadura en el que la fusión no se produjo entre la soldadura y las caras de fusión o las zonas de soldadura

adyacentes. Es el resultado de inadecuadas técnicas de soldadura, preparación inadecuada del metal o inadecuado diseño de junta.

Penetración incompleta: Es una condición de la raíz de la junta en el cual la soldadura no se extiende a través del espesor de la junta, es un área de inadecuada penetración y fusión, es una discontinuidad descrita como fusión incompleta de la junta.

Fisuras: Es definida como una fractura, un tipo de discontinuidad caracterizada por su terminación afilada y una alta relación de longitud y ancho a lo largo de la discontinuidad. Las fisuras a menudo se inician en las concentraciones de esfuerzos causados por discontinuidades o cerca de otras muescas mecánicas asociadas con el diseño de piezas soldadas.

Display A-Scan: Display de la amplitud de la señal ultrasónico como una función del tiempo.

Display b-scan: una vista en sección de los datos de inspección trazados, formadas por el apilamiento de los A-Scan. (Algunos usuarios se refieren a apilarse los A-Scan de las exploraciones no paralelas como D-Scan y reservar las utilizadas con escaneos paralelos como B-Scan.)

Forma de onda de radio frecuencia (RF): Una imagen A-Scan no rectificadas.

Back-Wall Echo: Un reflejo especular de la parte posterior de la pared del componente que está siendo examinado (por lo general se asume que es una plancha).

Lateral Wave: Una onda de compresión que viaja por la ruta más directa desde el transductor que transmite al transductor receptor en una configuración TOFD.

CAPÍTULO III: TÉCNICAS TOFD APLICADO A UNIONES A TOPE TERMOFUSIONADAS

3.1 Análisis de la Técnica TOFD

3.1.1 Equipo de Ultrasonido SIUI SUPOR

El SIUI SUPOR es un equipo mono-canal, capaz de trabajar en modo de Pulso/Eco o Transmisión/Recepción. [10]



Figura 22.- Vista frontal de SIUI SUPOR

En la Figura 22 se muestra la parte frontal de SIUI SUPOR, a continuación se muestra parámetros de transmisión y recepción de las señales ultrasónicas.

Ver Tabla 5.

Tabla 5
Parámetros de configuración en la medición de velocidades acústicas

	Parámetro	Símbolo	Valor			Unidades
Parámetros de Transmisión	Pulso de repetición	PRF	100 – 2000			Hz
	Anchura de pulso ultrasónico	WIDTH	0.6	0.4	0.3	µs
	Frecuencia de transductor	FREQ	2.5	3.5	5	MHz
	Amplitud	AMP	2V – 100V, min, step 2V			%
	Modo disparo	Tr	Tr+I			Interno Flanco Positivo
Parámetros de Recepción	Ganancia	GAN	0 – 110			dB
	Filtro paso bajo	LPF	Auto ajustable			MHz
	Filtro paso alto	HPF	Auto ajustable			MHz
	Rectificación	RECT	RF			-----
	Modo	TT	TT			Transmisión - Recepción

Fuente: *SUPOR. Super idea for ultrasonic inspection.*

3.1.1.1 Parámetros de Transmisión

La Frecuencia del Pulso de Repetición (PRF) corresponde a la frecuencia con la cual el equipo emite el tren de pulsos para la excitación del transductor, en este caso el intervalo es 100 – 2000 Hz que equivalen de 10 a 200 ms, entre pulsos consecutivos. Este es seleccionado adecuadamente para evitar el solapamiento entre las señales contiguas generadas.

El Ancho de Pulso (WIDTH) corresponde a la duración temporal en que se está excitando al transductor. Este valor será modificado convenientemente para los diferentes ensayos en función de la frecuencia

(fc) del transductor, ya que en la técnica TOFD, el número de pulsos recomendable es de 1 a 1.5 ciclos completos, por lo tanto, la estimación de este tiempo estará dado por la siguiente expresión.

$$t_p = 1.5 \frac{1}{f_c} \quad (36)$$

Por ejemplo, si queremos generar 1.5 pulsos ultrasónicos completos con un transductor de 2.5 MHz, se deberá parametrizar este tiempo de excitación a 0.6 μ s.

La Frecuencia del Transductor (FREQ) corresponde a la frecuencia de excitación con que se genera el pulso descrito anteriormente y dependerá de la frecuencia natural (fc) del cristal piezoeléctrico.

La Amplitud (AMP) corresponde al porcentaje del máximo voltaje de excitación posible (110 Voltios pico-pico) que genera este equipo. El valor será modificado en función del grado de atenuación que experimenta la señal al atravesar la pieza de ensayo, se incrementa cuando se necesita una mayor potencia de penetración en la probeta y se reduce para el caso contrario.

El Modo de Disparo indica la forma cómo es activado el pulso de excitación del transmisor, el mismo que ha sido seleccionado para que se realice de forma interna y con flanco positivo. Este parámetro se modificaría a otro estado, por ejemplo, cuando el proceso estuviese

retroalimentado por un sistema automatizado externo, que no es el caso en este trabajo.

3.1.1.2 Parámetros de Recepción

La Ganancia (GAN) es la amplificación de la señal captada por el receptor, que ayuda a contrarrestar la atenuación que experimenta la señal cuando ésta atraviesa la pieza de inspección.

Los Filtros de Paso Alto y Bajo (LPF y HPF) son los parámetros con los cuales actúan los filtros analógicos del equipo para atenuar las componentes en frecuencia que estarían fuera de los valores introducidos. Estos parámetros son modificados en función de la frecuencia de excitación del transductor.

La Rectificación (RECT) de la señal no es aplicada en esta técnica, por lo tanto, todo el pulso (ciclos positivos y negativos) es captado íntegramente mediante el estado RF.

3.1.2 Transductores

Para la técnica TOFD, lo conveniente es contar con transductores de incidencia perpendicular o normal.

En este trabajo se ha aprovechado los diferentes tipos de transductores que nos brinda el kits SIUI acoplado a diferentes cuñas.



Figura 23.- Transductores SIUI de 3.5 MHz

3.1.3 Cuñas de acople y cables

Para los transductores independientes, existen cuñas de acople de diferentes ángulos de incidencia, estos están fabricados con un material muy característico como es el Plexiglás® (CL=2730 m/s).

Cabe recalcar que el valor de los ángulos marcados en una de sus caras laterales, no corresponden los ángulo de incidencia de las mismas, haciéndose necesario medirlos y en función de las velocidades acústicas de los materiales, calcular los ángulos con que son refractados los haces ultrasónicos en el interior del material de prueba. Ver Figura 24.

Los ángulos de incidencia correspondientes a cada una de las cuñas están expuestos en la siguiente tabla. Ver Tabla 6:

Los cables utilizados en estos ensayos son de tipo coaxial, de baja impedancia (50Ω), adecuados para señales RF de alta frecuencia y sus terminales cuentan con conectores LEMO 00. Ver Figura 25.

Tabla 6
Ángulos de incidencia de las cuñas de acople

Cuña	Ángulo de Incidencia
45°	40°
60°	51°
70°	58°

Fuente: SUPOR. *Super idea for ultrasonic inspection*



Figura 24.- Cuñas con diferentes ángulos de incidencia



Figura 25.- Cable coaxial LEMO 00

3.1.4 Encoder

El Encoder es un codificador rotatorio, también llamado codificador de eje o generador de pulsos, suele ser un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor.

Los Encoder deberán ser calibrados de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y confirmados por el movimiento de una mínima distancia de 20 in (500mm) y la distancia mostrada en la pantalla deberá ser $\pm 1\%$ de la distancia actual movida.



Figura 26.- Encoder SIUI

3.1.5 Interpretación de la Técnica TOFD, Basado en la Norma ASME V, Artículo 4, Apéndice N. Time Of Flight Diffraction (TOFD) Interpretation

Las imágenes del TOFD aparecen habitualmente como escala de grises, imagen de la A-scan digitalizada. Figura 27, se muestra las señales de onda (LW) y (BW) que son visibles en forma continua de líneas multiciclo. El defecto mostrado consiste de una señal de la punta superior e inferior visible. Estos se muestran como señales multiciclo intermedias entre la (LW) y (BW).

Las señales del TOFD presentan cambios de fase, algunas señales son en blanco y negro blanco; otros son negro y negro blanco. Esto permite la identificación de la onda fuente (parte superior o inferior defecto, etc), así como que se utiliza para el dimensionamiento de los defectos. Dependiendo de la fase del impulso incidente (normalmente un voltaje negativo), la onda lateral sería, entonces la primera en difractarse (punta superior) señal positiva, la segunda difractada (punta inferior) señal negativa, y el eco de fondo señal negativa. [11]

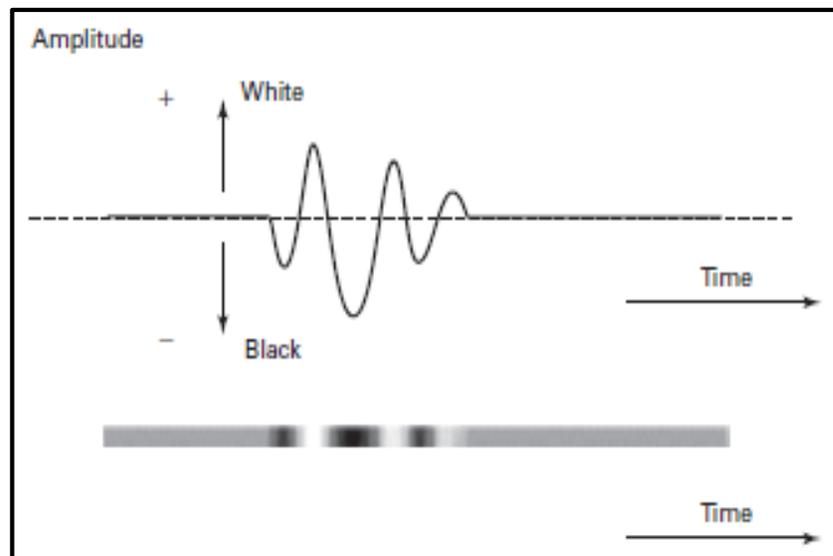


Figura 27.- Transformación de onda que muestra escala de grises

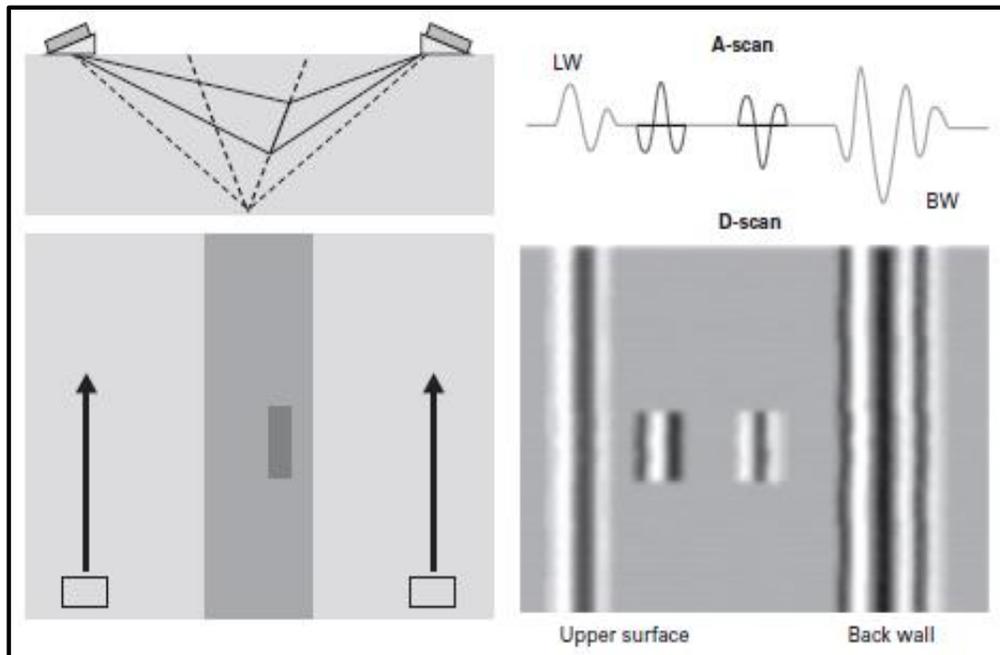


Figura 28.- Generación de escala de grises B-Scan a partir de múltiples A-Scan

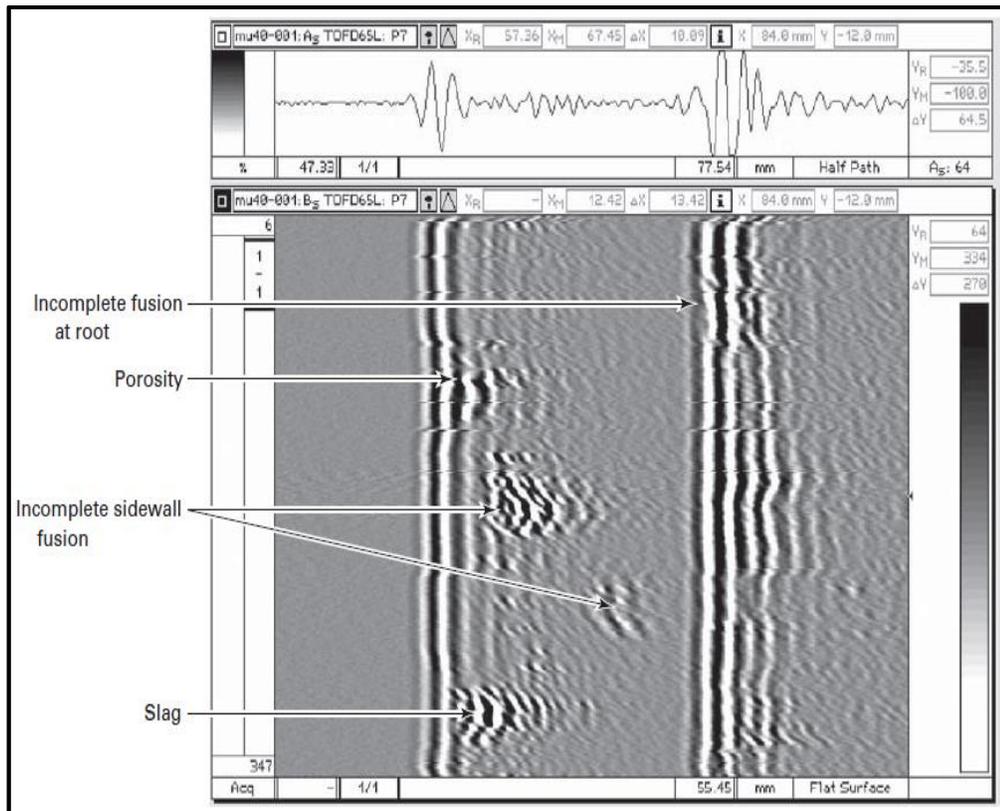


Figura 29.- Pantalla B-Scan con múltiples defectos

3.1.5.1 Morfología de Defectos y Generación de Imágenes B-Scan

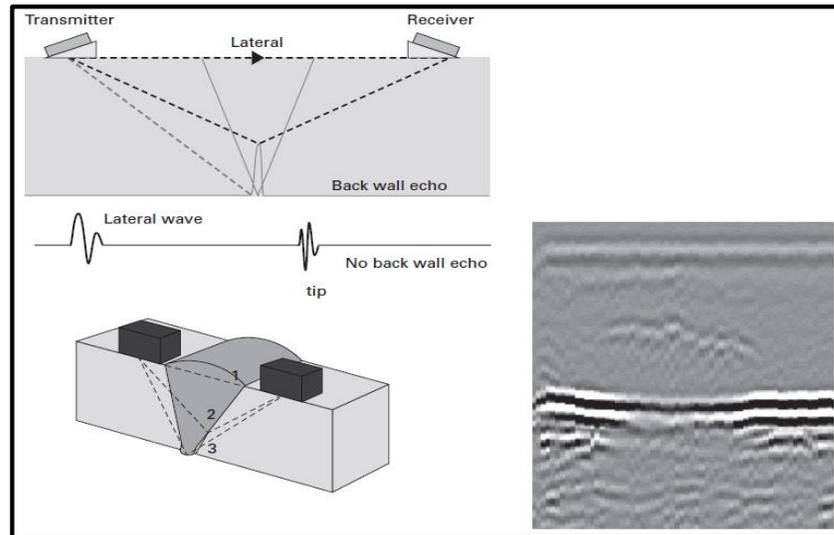


Figura 30.- Defecto interior por grieta superficial

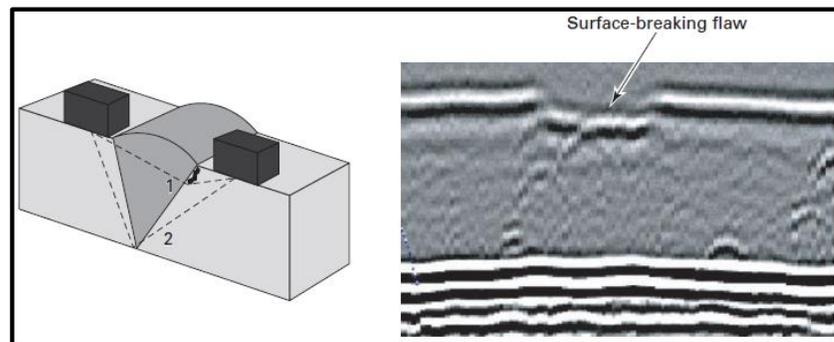


Figura 31.- Defecto exterior por grieta superficial

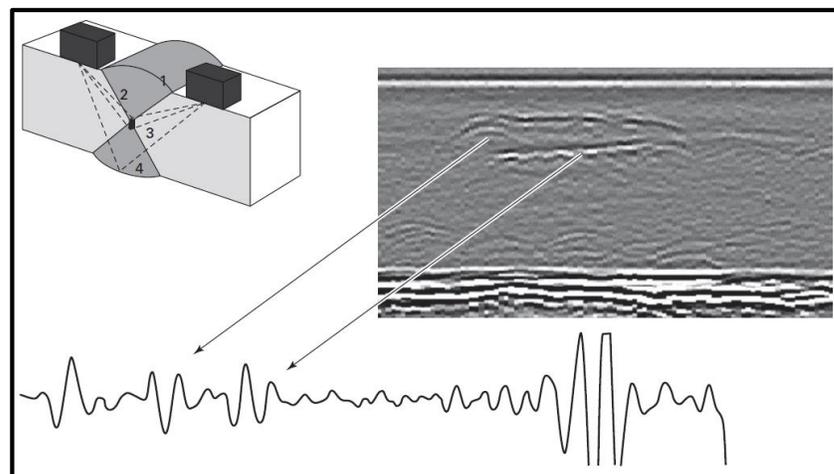


Figura 32.- Defecto en centro de cordón de soldadura

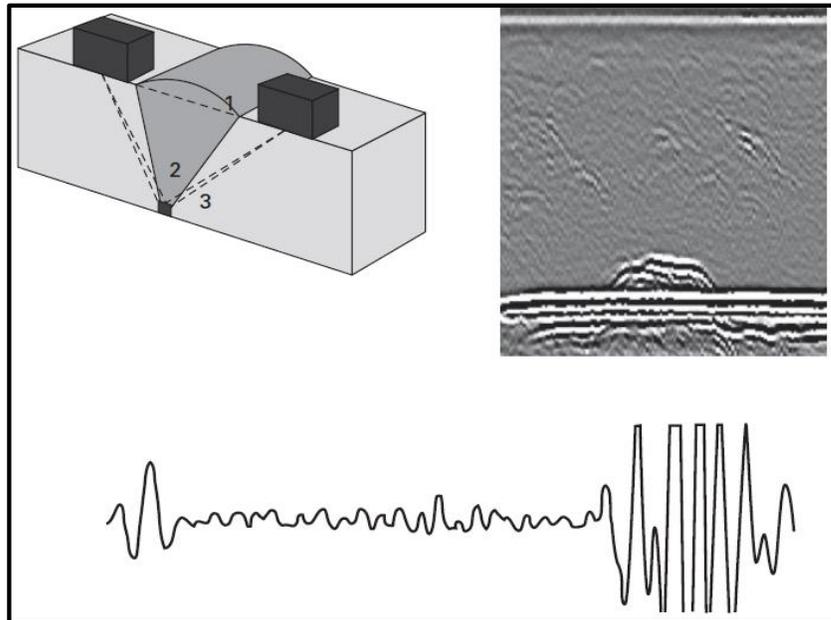


Figura 33.- Defecto por falta de penetración en la raíz

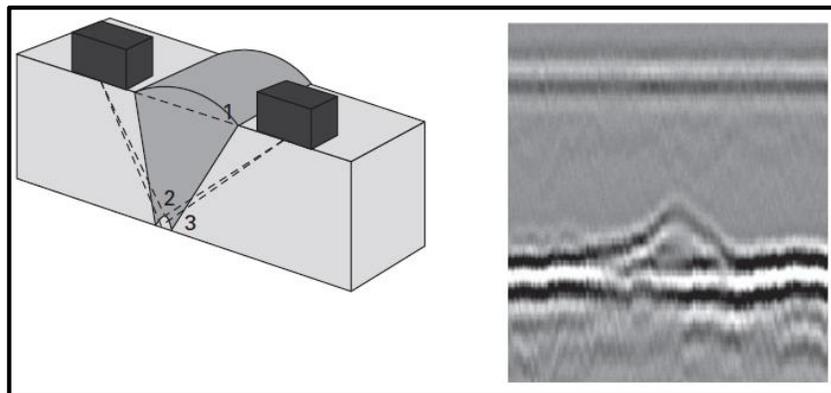


Figura 34.- Defecto por concavidad en la raíz

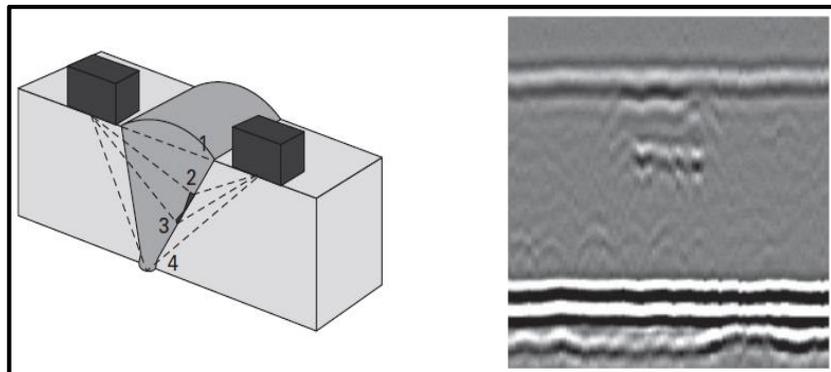


Figura 35.- Defecto por falta de fusión en pared lateral

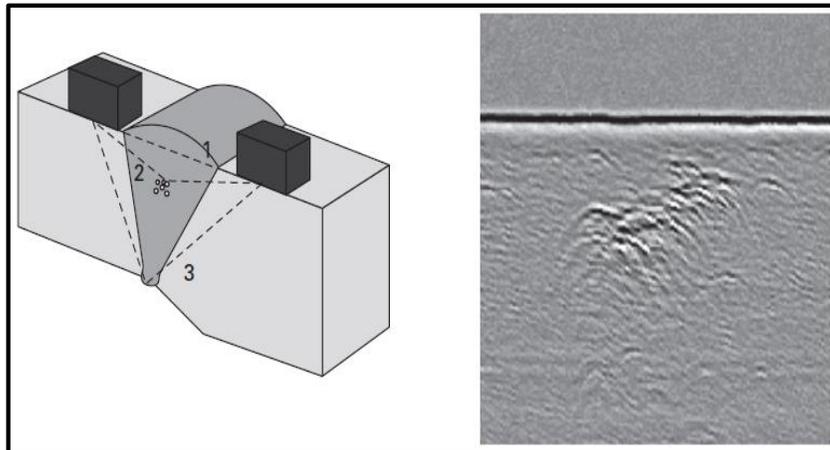


Figura 36.- Defecto por poros

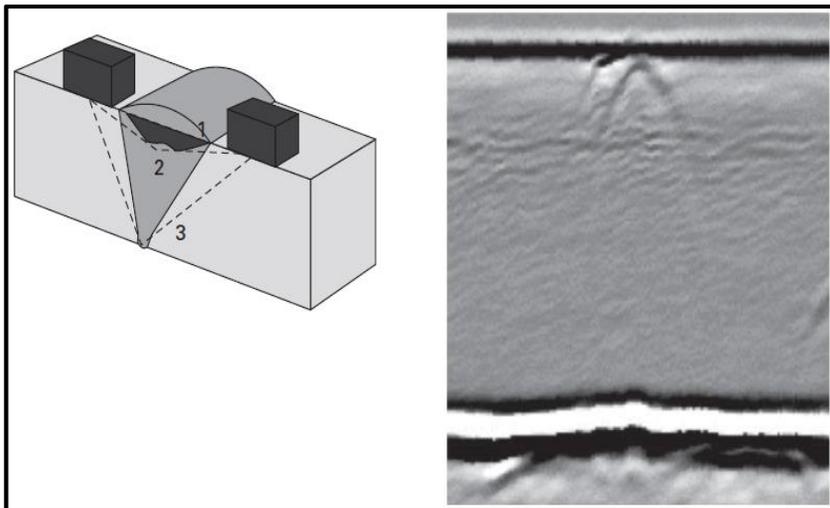
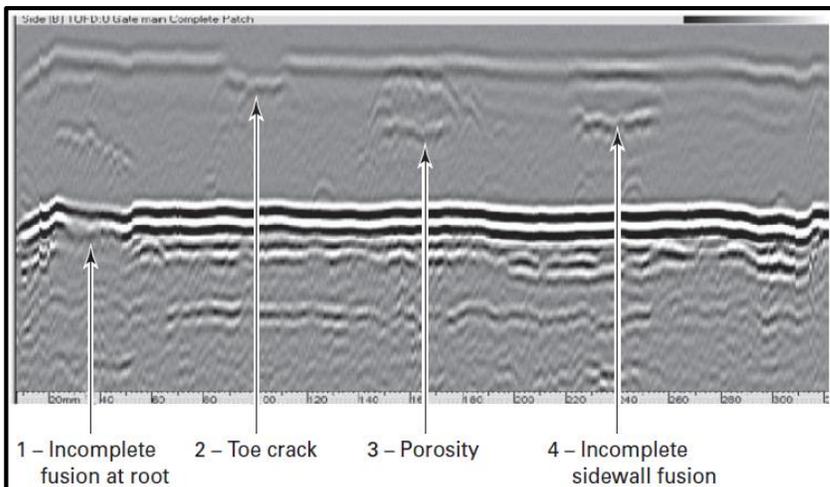


Figura 37.- Defecto por grita transversal



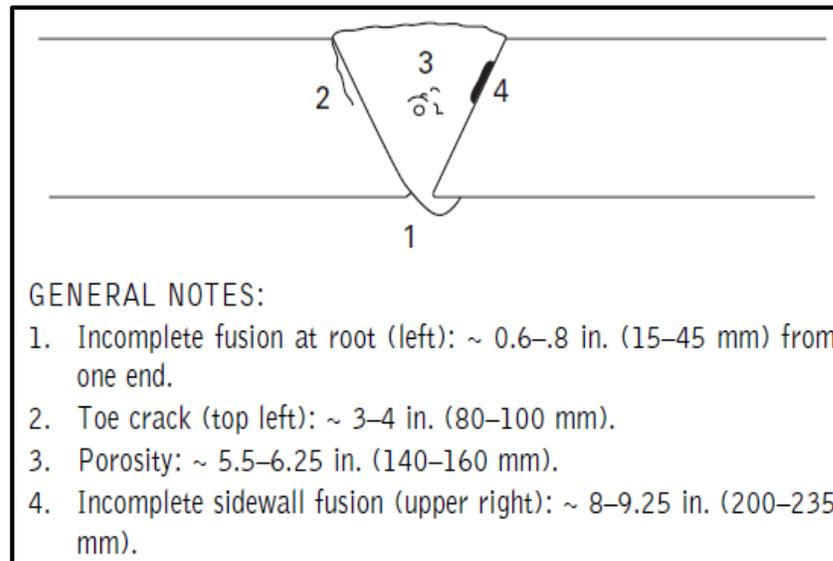


Figura 38.- Localización del LW, BW y cuatro defectos

3.2 Construcción de la Técnica TOFD

3.2.1 Control de calidad de las soldaduras a tope

A continuación se presentan los factores que influyen en la calidad de la soldadura [12].

3.2.1.1 Condiciones de trabajo

El viento puede causar problemas en la calidad de la soldadura. Se pueden enfriar zonas de la placa y causar desigual distribución de temperatura en la misma. Es recomendable proteger la unión del sol, de la lluvia, del viento y del polvo, generando un microclima en el lugar de trabajo. Bajas temperaturas ambientales no implican necesariamente que la calidad de las soldaduras sea mala, es posible obtener buenas soldaduras a temperaturas de -5°C .

Hay que tener cuidado de mantener limpios los extremos de los tubos y la placa calefactora, libres de polvo, arena o arcilla. Una soldadura contaminada puede producir defectos considerables. La suciedad se elimina usando un trapo limpio. Hay que tener la precaución de no tocar con las manos las superficies a soldar una vez refrentadas.

3.2.1.2 Alineamiento

Desalineaciones de los extremos de los tubos pueden también causar aparición de defectos. Estas pueden ser causadas por un alineamiento incorrecto del tubo en las abrazaderas de la máquina o porque los extremos estén mal cortados o refrentadas. Es importante conseguir una desalineación lo más pequeña posible. Si el desalineamiento es excesivo, se pueden producir formas afiladas (entallas), con concentración de tensiones. El desalineamiento no debe exceder del 10% del espesor del tubo.

3.2.1.3 Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura a tope son: Presión, Temperatura y Tiempo. Es imprescindible cumplir con estos parámetros definidos si queremos obtener una soldadura fiable y duradera.

3.2.1.4 Diferencia de espesores

Se recomienda no unir tubos de diferente material y con distintos espesores de pared, utilizando la soldadura a tope: [12]

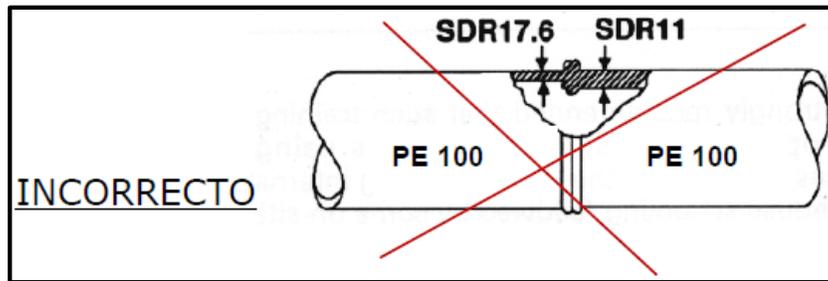


Figura 39.- Sección de soldadura a tope incorrecto

El procedimiento de soldadura a tope solamente debe ser utilizado para unir tubos con el mismo espesor de pared:

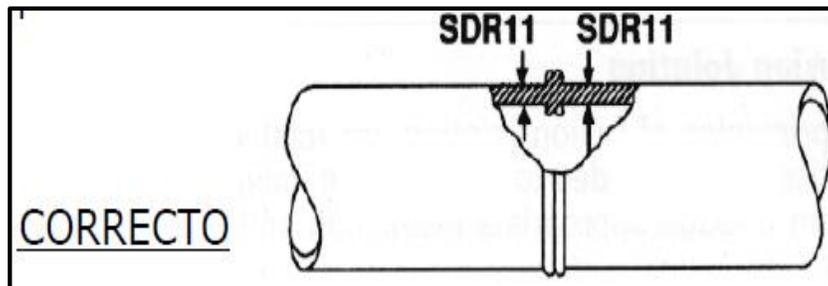
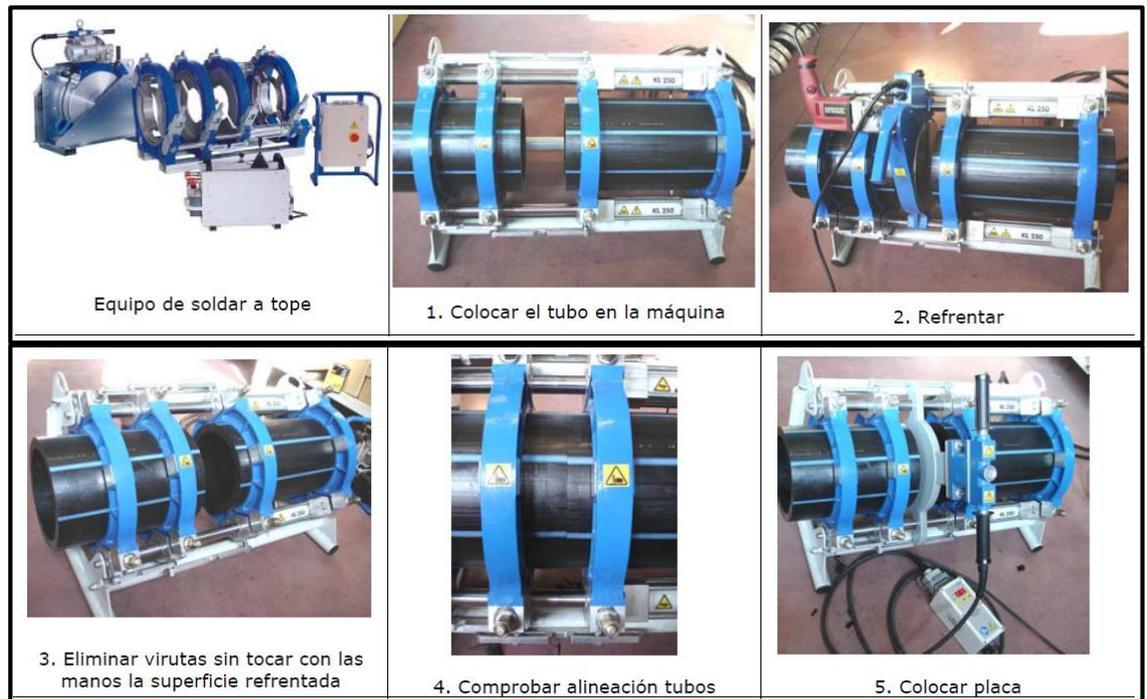


Figura 40.- Sección de soldadura a tope correcto



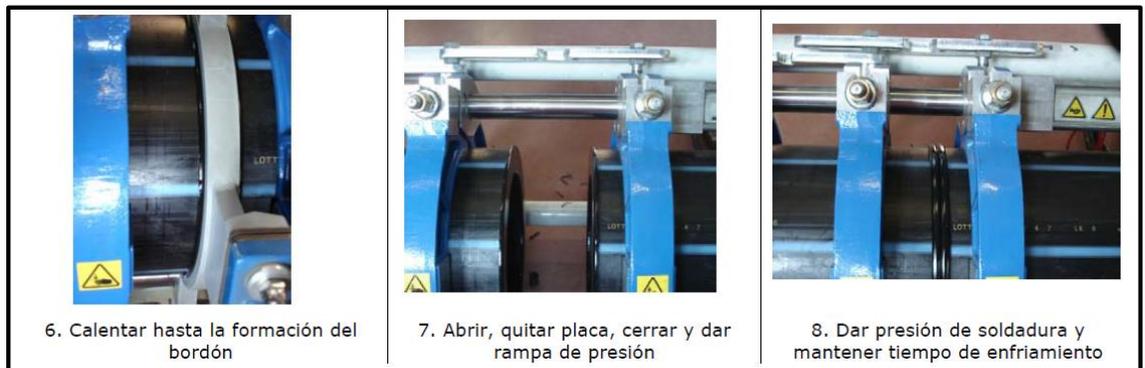


Figura 41.- Proceso de soldadura a tope por termofusión

3.2.2 Métodos No Destructivos

Ejemplos de métodos no destructivos son:

Inspección visual del cordón de soldadura (método comúnmente utilizado), ver anexos PQR.

No usuales para tubos en obra, inspección por ultrasonido, radiografía, termografía, reflexión holográfica y ensayos de alta frecuencia eléctrica.

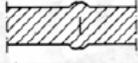
3.2.2.1 Inspección Visual

La inspección visual es muy valiosa y sirve para detectar algunos defectos, como desalineación, poros o inclusiones, errores en los parámetros de soldadura. Aunque un correcto cordón no es suficiente garantía de buenas propiedades mecánicas, esta inspección visual es necesaria para el control de calidad en la obra.

Si la soldadura obtenida es defectuosa, deben cortarse los extremos y soldar de nuevo, no obstante, si se siguen los pasos e

indicaciones para la correcta ejecución de una soldadura a tope, la soldadura a tope será resistente y segura. [12]

Tabla 7
Tipos de cordón

Correcto	
	1.- Cordón redondeado. <i>Soldadura correcta.</i>
Incorrecto	
	2.- Cordón demasiado estrecho y alto. <i>Exceso de presión.</i>
	3.- Cordón es muy pequeño. <i>Presión insuficiente.</i>
	4.- Hendidura profunda en el centro del cordón. <i>Temperatura insuficiente o tiempo de transición demasiado largo.</i>
	5.- Desalineamiento. <i>La desviación máxima permitida es del 10% del espesor de pared.</i>
	6.- Diferentes espesores de pared. <i>Se recomienda utilizar accesorios electrosoldados.</i>
	7.- Los materiales tienen diferentes temperaturas de fusión.

Fuente: *Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos. Soldadura térmica en tuberías de polietileno (PE).*

3.2.2.2 Inspección por Ultrasonido

Los ultrasonidos son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas, diferenciándose de éstas en que su campo de frecuencias se encuentra en la zona audible.

Este método es uno de los principales métodos de Ensayos No Destructivos, para el control de la calidad y evaluación de materiales en la industria de hoy en día. Su aplicación permite conocer la integridad del material en su espesor y detectar discontinuidades internas que no son

visibles en la superficie de la soldadura. Además de la determinación de diferencias en la estructura del material y sus propiedades físicas. [13]

La aplicación de esta técnica (TOFD), cubre la inspección de uniones termofusionadas a tope de penetración y fusión total de tuberías de HDPE, con espesores desde 9 hasta 300 mm. [14]

Mediante esta técnica podremos identificar, caracterizar y dimensionar en ubicación, longitud y altura de las discontinuidades y/o defectos de soldadura, tales como fisuras (C), falta de fusión (LOF), falta de penetración (IP), escorias (S), porosidades (P), desalineamientos (Hi-Lo), laminaciones (L), etc. [14]

3.2.2.3 Configuración del Equipo

Se debe tener en cuenta los parámetros que ingresaremos al equipo:

- PCS o 2S

Es la distancia entre las caras de los transductores ver Figura 18, se calcula con la siguiente expresión: [15]

$$PCS = \frac{4}{3}htan\theta \quad (37)$$

$$PCS = 2ftan\theta \quad (38)$$

Dónde:

PCS = Distancia entre Transductores (mm).

h = Espesor de la pieza a inspeccionar (mm).

e = Ángulo de la cuña utilizada.

f = Focus (mm).

Para el caso en particular de nuestro equipo utilizado la distancia de inspección es hallada por la siguiente expresión:

$$D = PCS - d \quad (39)$$

Dónde:

D = Distancia de Inspección entre Transductores (mm).

PCS = Distancia entre Transductores (mm).

d = Se obtiene de la calibración de retardo (mm).

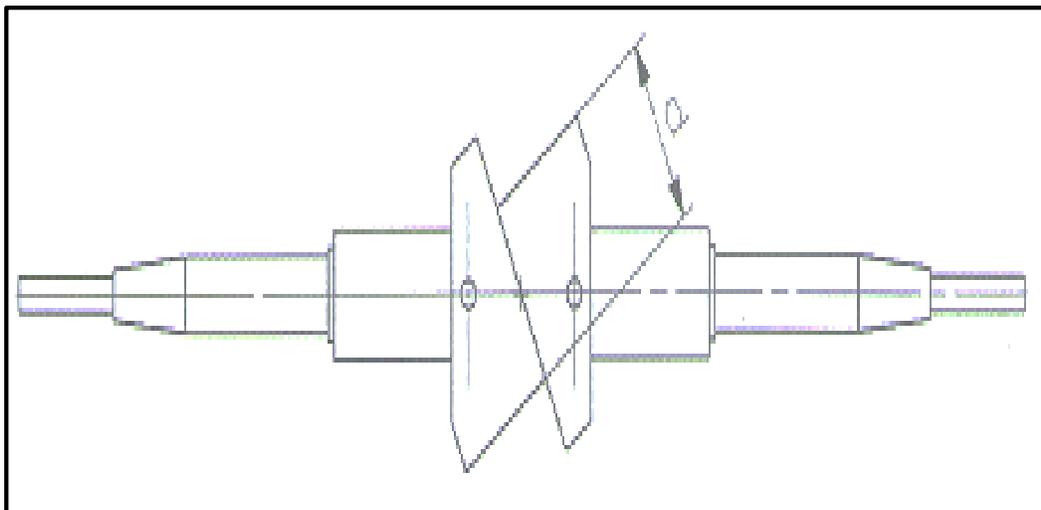


Figura 42.- Calibración de Retardo

- Dimensión de los Transductores

La dimensión de los transductores se obtiene de las siguientes tablas de recomendación. Ver Tabla 8 y Tabla 9.

- Frecuencia de los transductores

La frecuencia a utilizar de los transductores se obtiene de las siguientes tablas de recomendación. Ver Tabla 8 y Tabla 9.

- Ángulo de la Cuña Utilizada

El ángulo de las cuñas a utilizar se obtiene de las siguientes tablas de recomendación. Ver obtener de la Tabla 8 y Tabla 9.

- Tipo de Material

Para el presente trabajo el material es el HDPE (Polietileno de Alta Densidad).

- Velocidad Longitudinal del Sonido Aplicable al Material

La velocidad Longitudinal del HDPE es 2460 m/s. Ver Tabla 1.

- Espesor de Material a Inspeccionar

Para el presente trabajo se han utilizado diferentes espesor, siendo los siguientes (18 mm / 24 mm / 30 mm / 36 mm / 70 mm / 74 mm).

Las siguientes tablas proporcionan parámetros recomendados de la unidad de búsqueda generales para rangos de espesor especificados

en soldaduras ferríticas. Para materiales de alta atenuación austeníticos o de otro tipo, las frecuencias nominales necesitan ser reducidas y la dimensión del elemento debe ser incrementada. [14]

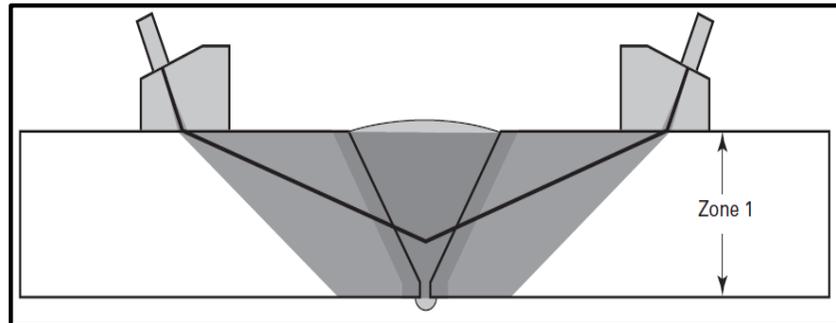


Figura 43.- Ejemplo de una configuración con una simple zona de inspección

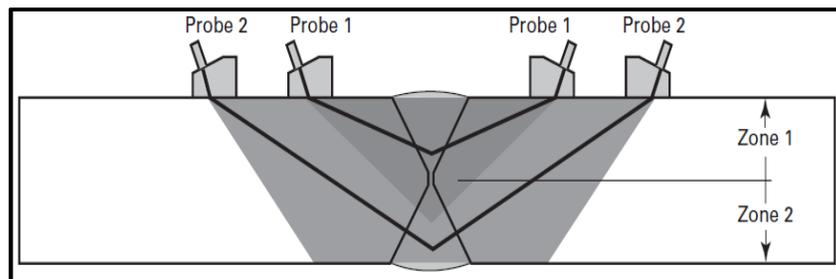


Figura 44.- Ejemplo de una configuración con dos zonas de inspección (igual altura de las zonas)

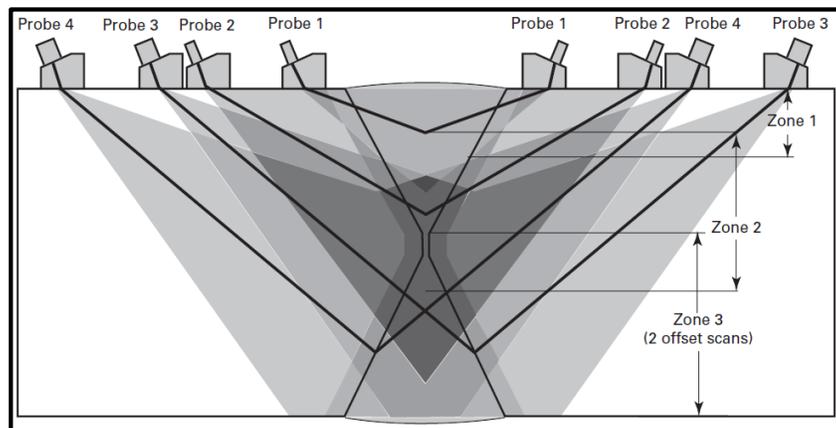


Figura 45.- Ejemplo de una configuración con tres zonas de inspección

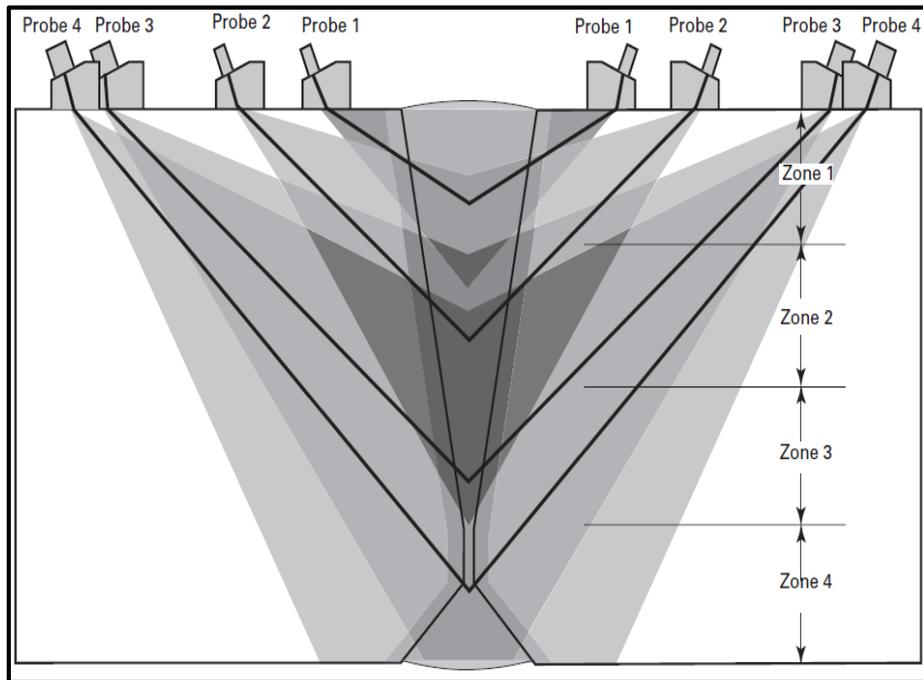


Figura 46.- Ejemplo de una configuración con cuatro zonas de inspección (igual altura de las zonas)

Tabla 8

Parámetros para una zona, aplicable hasta 3 in (75 mm)

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: ADEMINSA. (2013). *Procedimiento de Examinación de Uniones Soldadas y Termofusionadas por Ultrasonido Mediante la Técnica Time OF Flight Diffraction (TOFD)*, de Acuerdo al Código ASME Sección V-Art 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373-04.

Tabla 9
Parámetros para múltiples zonas, aplicable hasta 12 in (300 mm)

Thickness, t, in. (mm)	Nominal Frequency, MHz	Element Size, in. (mm)	Angle, deg
< 1.5 (< 38)	5 to 15	0.125 to 0.25 (3 to 6)	50 to 70
1.5 to 12 (38 to 300)	1.5 to 5	0.25 to 0.5 (6 to 13)	45 to 65

Fuente: ADEMINSA. (2013). *Procedimiento de Examinación de Uniones Soldadas y Termofusionadas por Ultrasonido Mediante la Técnica Time OF Flight Diffraction (TOFD), de Acuerdo al Código ASME Sección V-Art 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373-04.*

Tabla 10
Recomendaciones de la división de las zonas de inspección

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: ADEMINSA. (2013). *Procedimiento de Examinación de Uniones Soldadas y Termofusionadas por Ultrasonido Mediante la Técnica Time OF Flight Diffraction (TOFD), de Acuerdo al Código ASME Sección V-Art 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373-04.*

3.2.2.4 Unidad de búsqueda

Los transductores de ultrasonido se ajustaran a los siguientes requisitos mínimos [16]:

a.- Dos transductores deberán ser utilizados en un arreglo pitch-catch (emisor-receptor), par de TOFD.

b.- El par de transductores TOFD deberán tener la misma frecuencia nominal.

c.- El par de transductores TOFD tendrán la misma dimensión de sus elementos.

d.- La duración del pulso en el transductor no deberá sobrepasar 2 ciclos, medidos al nivel de 20 dB por debajo del nivel máximo de respuesta.

e.- Los transductores pueden ser enfocados o desenfocados. Transductores desenfocados se recomienda para la detección y transductores enfocados son recomendados para una mejor resolución para el dimensionamiento.

f.- La frecuencia nominal será de 2 a 15 MHz serán usados, a menos que otras variables, como la estructura de grano del material de producción, requieren el uso de otras frecuencias para asegurar la penetración adecuada o mejor resolución.

3.2.2.5 Bloques de Calibración

Reflectores, agujeros perforados laterales (SDH) deberán ser usados para confirmar la adecuada configuración de la sensibilidad.

Bloques de calibración básicos, la configuración del bloque de calibración básico y la ubicación de sus reflectores deberán ser como los mostrados en la Figura 47. Un mínimo de dos agujeros por zona, si la soldadura está dividida en múltiples zonas, es requerido. Ver la Figura 48 para ejemplos de dos zonas de inspección. La medida del bloque y localización de los reflectores deberá ser la adecuada para confirmar la adecuada configuración de la sensibilidad para los haces de ángulos usados.

El bloque de calibración de referencia debe tener las dimensiones suficientes para garantizar el adecuado movimiento de los transductores sobre la superficie de examinación en la dirección del escaneo a realizarse sobre la pieza de evaluación. Se debe garantizar que exista libre recorrido del Encoder sobre la superficie del bloque para registrar al menos 25 a 30 mm (1 a 1.25 in) de distancia de inspección.

Espesor del bloque, este deberá ser de al menos $\pm 10\%$ del espesor nominal de la pieza a ser examinada para espesores hasta 4 in (100 mm) o ± 0.4 in (10 mm) para espesores sobre las 4 in (100 mm). [14]

Alternativamente, un bloque más grueso puede utilizarse siempre que el tamaño reflector de referencia se basa en el espesor a ser examinado y un número adecuado de orificios exista para cumplir con los requisitos. [11]

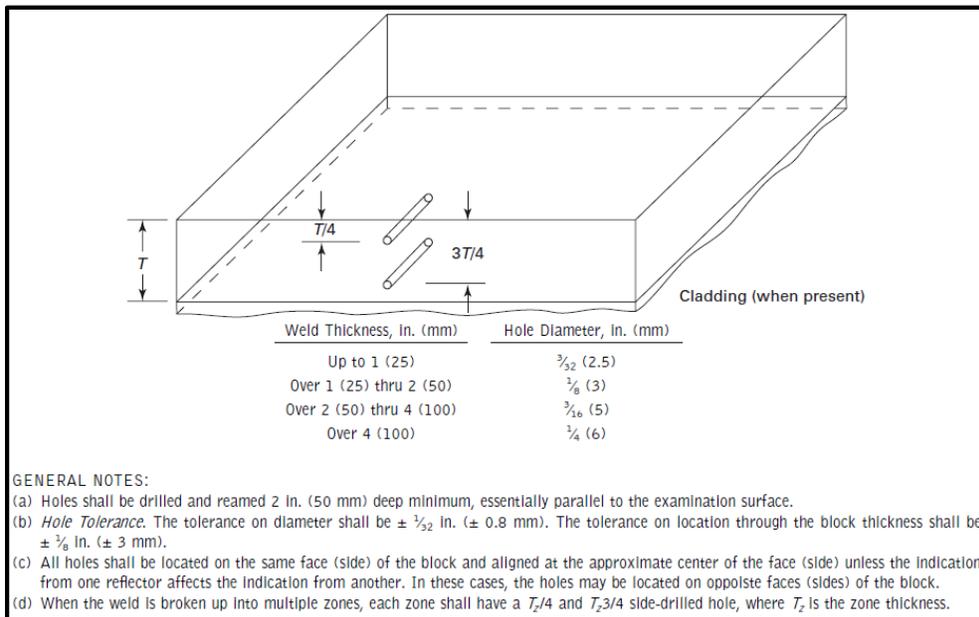


Figura 47.- Bloque de referencia para una zona de inspección

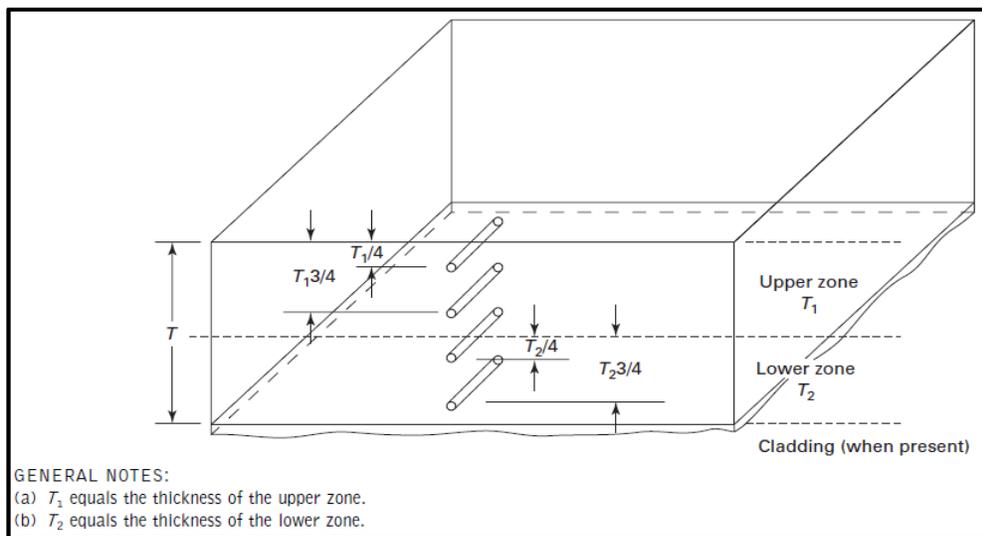


Figura 48.- Bloque de referencia para dos zonas de inspección

3.2.2.6 Criterios de Aceptación

Mediante la comparación de los resultados del A-Scan y D-Scan, con los estándares de aceptación, la soldadura será juzgada como aceptable o rechazada, basada en la severidad de la discontinuidad.

Cualquier partícula embebida que salga a la superficie interna o externa o que atraviese la pared completa es interpretada como una falta de fusión o penetración incompleta.

Imperfecciones que no son interpretadas como falta de fusión (LOF) o penetración incompleta (IP), pueden ser o no consideradas para rechazar la soldadura. Cualquier dimensión de un reflector identificado como indicación o defecto similares a grietas no deben ser mayores que el tamaño permitido así:

- Para espesores menores de 25.4 mm, el tamaño crítico es de 1/3 del espesor de la pared.
- Para espesores mayores de 25.4 mm, el tamaño crítico es de 9.5 mm.

La presencia de múltiples indicaciones (puntos de reflexión, fusión incompleta, grietas) dan como resultado el rechazo de la soldadura. Los defectos de la soldadura deben ser categorizados basados en los criterios de rango de severidad mostrado en la tabla 11. [14]

Los defectos detectados en uniones termofusionadas se evaluarán de acuerdo a los criterios de aceptación dados en el Código ASME B31.3, Edición 2012, Tabla A341.3.2. (Tabla 12), teniendo en cuenta que las áreas con penetración incompleta (IP) y falta de fusión (LOF) serán inaceptables sin importar su longitud.

Tabla 11
Criterios de Rangos de Severidad de la Soldadura

Inspección por UT-TOFD – Rango de Severidad			
Tipo de Defecto	Categoría 1	Categoría 2	
1 – 6 Puntos reflectores		X	
7 Puntos reflectores	X		
Múltiples puntos de reflectores	X		
Grieta menor a la longitud del defecto crítico	X		
Grieta mayor a la longitud del defecto crítico	X		
Fusión incompleta	X		
Fusión incompleta más punto reflector	X		
Pérdida de onda longitudinal y/o onda de fondo	X		
Daños mecánicos y cortaduras		X	

Notas:

Categoría 1. Contiene varios defectos y deben ser removidos.

Categoría 2. Contiene defectos mayores y deben ser removidos a consideración del inspector.

Fuente: ADEMINS. (2013). *Procedimiento de Examinación de Uniones Soldadas y Termofusionadas por Ultrasonido Mediante la Técnica Time OF Flight Diffraction (TOFD), de Acuerdo al Código ASME Sección V-Art 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373-04.*

Tabla 12
Criterios de aceptación dados en el Código ASME B31.3, Edición 2012

Tipo de imperfección	Termoplásticos			RTR y RPM [Nota (1)]
	Soldado con gas caliente	Solvente cementado	Fusión térmica	Adhesivo cementado
Grietas	No permitido	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Áreas sin material de aporte en juntas	No permitido	No permitido	No permitido	No permitido
Áreas sin adhesivo en juntas	No aplicable	No permitido	No permitido	No permitido
Inclusiones de material carbonizado	No permitido	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Inclusión de material de relleno no fundido	No permitido	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Proyección de material dentro de la tubería, % del espesor de pared del tubo	No aplicable	Cemento 50%	Material fundido 25%	Adhesivo 25%

Nota:

(1) RTR = Resina reforzada termoestable, RPM = Argamasa plástica reforzada

Fuente: ADEMINSA. (2013). *Procedimiento de Examinación de Uniones Soldadas y Termofusionadas por Ultrasonido Mediante la Técnica Time OF Flight Diffraction (TOFD)*, de Acuerdo al Código ASME Sección V-Art 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373-04.

3.3 Consolidación de Resultados

3.3.1 Inspecciones de los Diferentes Espesores Mediante la Técnica TOFD

3.3.1.1 Inspección 1: Ø12" SDR 17, Espesor 18 mm

Tabla 13

Parámetros Insertados al Equipo Inspección 1

Parámetros Insertados al Equipo	
PCS o 2S	42 mm
d	18 mm
D	24 mm
f	12 mm
Dimensión de los Transductores	Ø10 mm
Frecuencia de los Transductores	5 MHz
Ángulo de Cuña	60°
Tipo de Material	HDPE
Velocidad Longitudinal	2460 m/s
Espesor	18 mm

Fuente: *Elaboración propia*

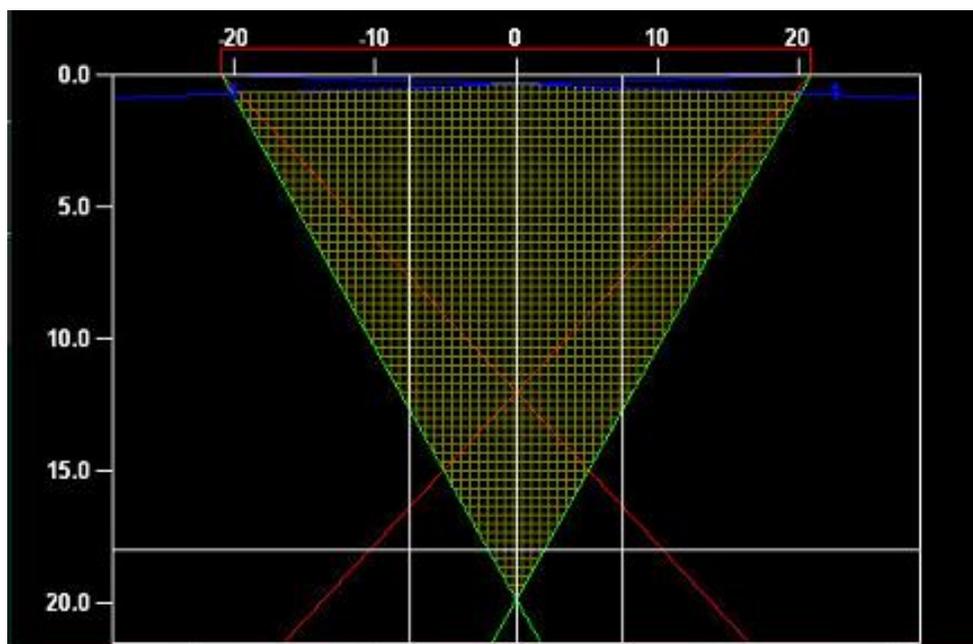


Figura 49.- Configuración de Junta Inspección 1

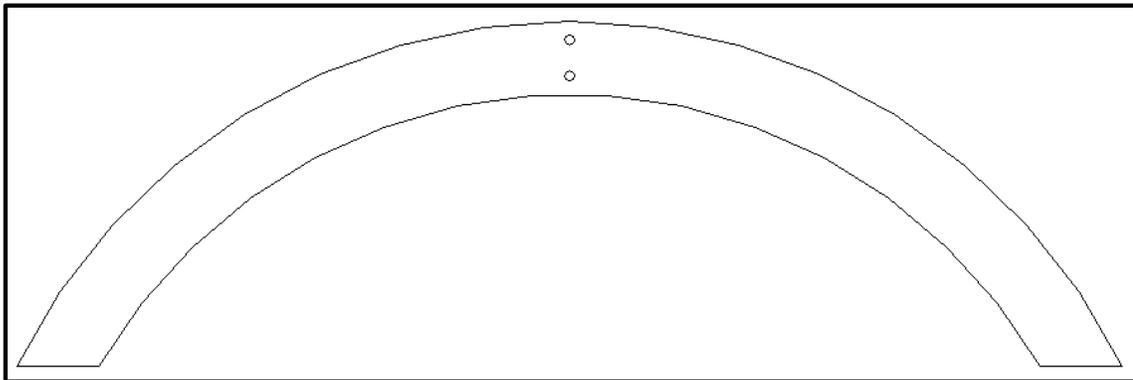


Figura 50.- Bloque de Referencia Inspección 1

Tabla 14

Datos del Bloque de Referencia Inspección 1

Datos del Bloque de Calibración	
Espesor	18 mm
Agujeros	Ø2.5 mm
Ubicación del 1 ^{er} agujero 1/4t	4.5 mm
Ubicación del 2 ^{do} agujero 3/4t	13.5 mm

Fuente: *Elaboración propia*

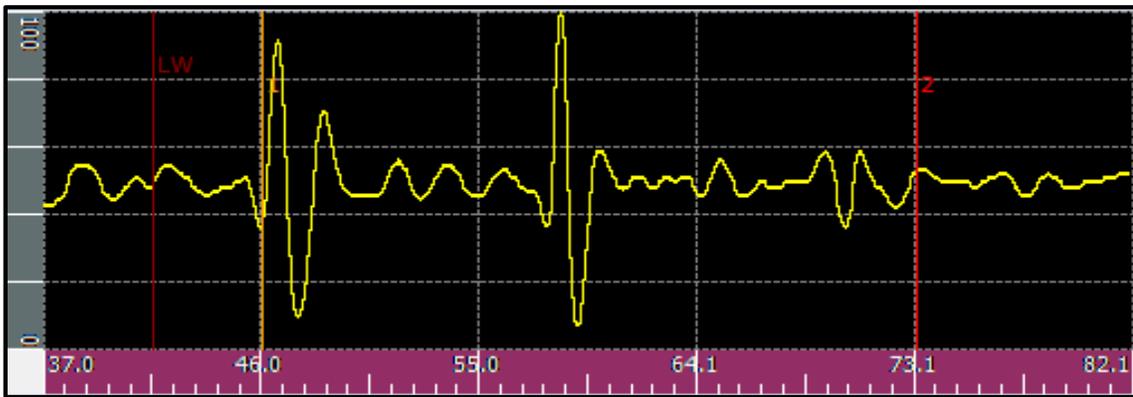


Figura 51.- Vista A-Scan Inspección 1

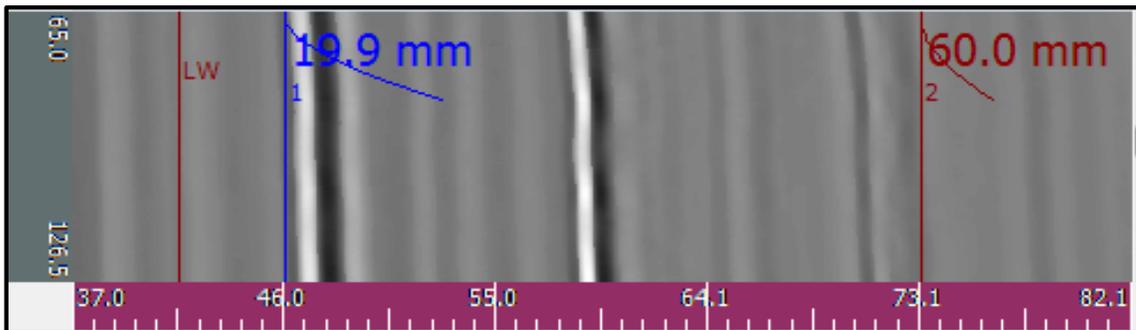


Figura 52.- Vista B-Scan Inspección 1

Tabla 15
Datos Evaluados Inspección 1

Datos de Evaluación	
Población	110 Unidades
Muestra	11 Unidades
Examinaciones Aceptadas	11 Unidades
Examinaciones Rechazadas	0 Unidades

Fuente: *Elaboración propia*

- Observaciones

Se utilizó la velocidad longitudinal y los resultados son aceptables.

Se detectan las dos ondas, superficial (LB) y eco de fondo (BW) y coinciden con los tiempos de vuelo respectivos.

La continuidad del eco de fondo en todo el recorrido, nos permitirá deducir si existe algún defecto interno y no sobresale a la superficie.

La no continuidad del eco de fondo, permite deducir que existe un defecto que obstaculiza la propagación de las ondas.

3.3.1.2 Inspección 2: Ø16" SDR 17, Espesor 24 mm

Tabla 16
Parámetros Insertados al Equipo Inspección 2

Parámetros Insertados al Equipo	
PCS o 2S	55 mm
d	18 mm
D	37 mm
f	16 mm
Dimensión de los Transductores	Ø10 mm
Frecuencia de los Transductores	5 MHz
Ángulo de Cuña	60°
Tipo de Material	HDPE
Velocidad Longitudinal	2460 m/s
Espesor	24 mm

Fuente: *Elaboración propia*

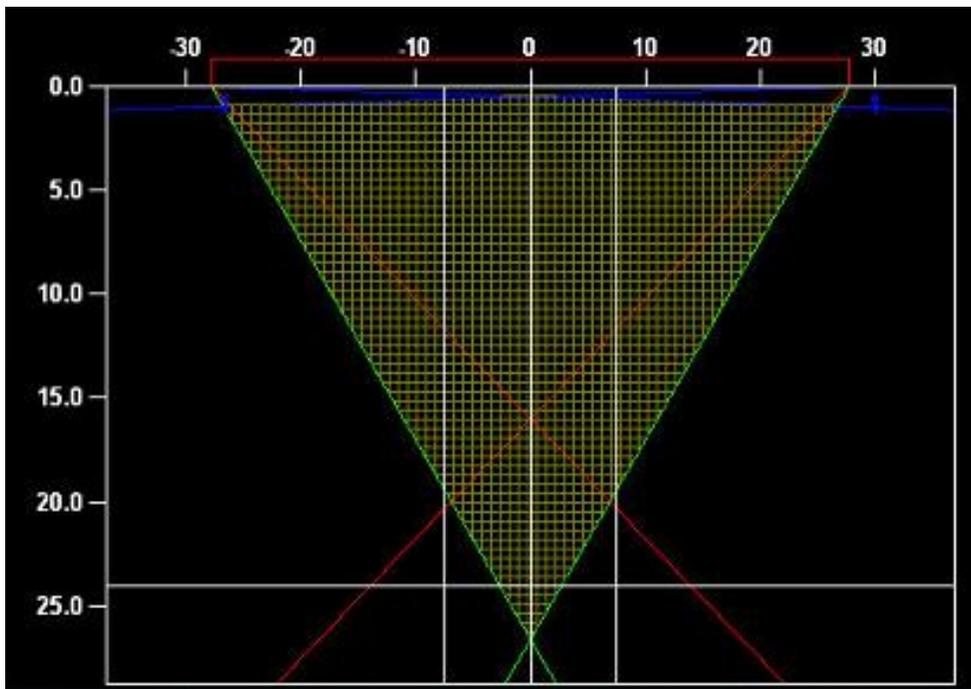


Figura 53.- Configuración de Junta Inspección 2

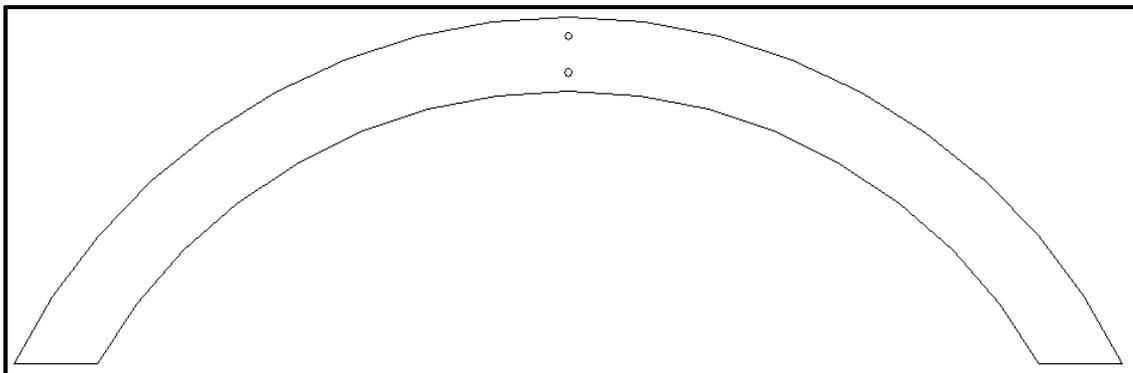


Figura 54.- Bloque de Referencia Inspección 2

Tabla 17

Datos del Bloque de Referencia Inspección 2

Datos del Bloque de Calibración	
Espesor	24 mm
Agujeros	Ø2.5 mm
Ubicación del 1 ^{er} agujero 1/4t	6 mm
Ubicación del 2 ^{do} agujero 3/4t	18 mm

Fuente: *Elaboración propia*

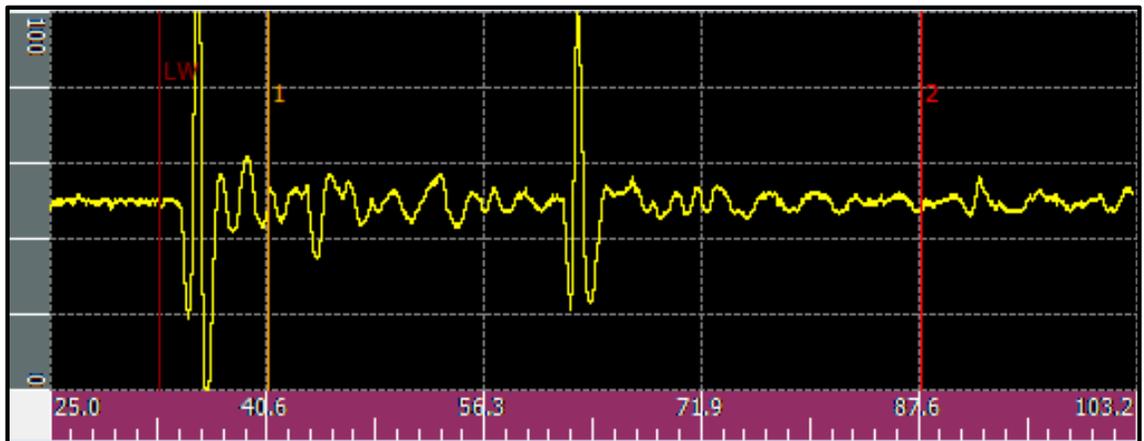


Figura 55.- Vista A-Scan Inspección 2

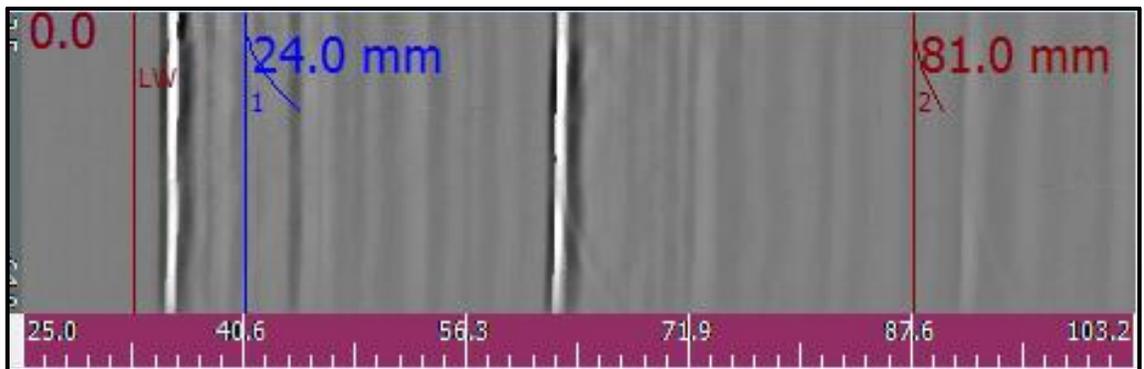


Figura 56.- Vista B-Scan Inspección 2

Tabla 18
Datos Evaluados Inspección 2

Datos de Evaluación	
Población	144 Unidades
Muestra	14 Unidades
Examinaciones Aceptadas	14 Unidades
Examinaciones Rechazadas	0 Unidades

Fuente: *Elaboración propia*

- Observaciones

Se utilizó la velocidad longitudinal y los resultados son aceptables.

Se detectan las dos ondas, superficial (LB) y eco de fondo (BW) y coinciden con los tiempos de vuelo respectivos.

La continuidad del eco de fondo en todo el recorrido, nos permitirá deducir si existe algún defecto interno y no sobresale a la superficie.

La no continuidad del eco de fondo, permite deducir que existe un defecto que obstaculiza la propagación de las ondas.

3.3.1.3 Inspección 3: Ø20" SDR 17, Espesor 30 mm

Tabla 19

Parámetros Insertados al Equipo Inspección 3

Parámetros Insertados al Equipo	
PCS o 2S	69 mm
d	18 mm
D	51 mm
f	20 mm
Dimensión de los Transductores	Ø10 mm
Frecuencia de los Transductores	5 MHz
Ángulo de Cuña	60°
Tipo de Material	HDPE
Velocidad Longitudinal	2460 m/s
Espesor	30 mm

Fuente: *Elaboración propia*

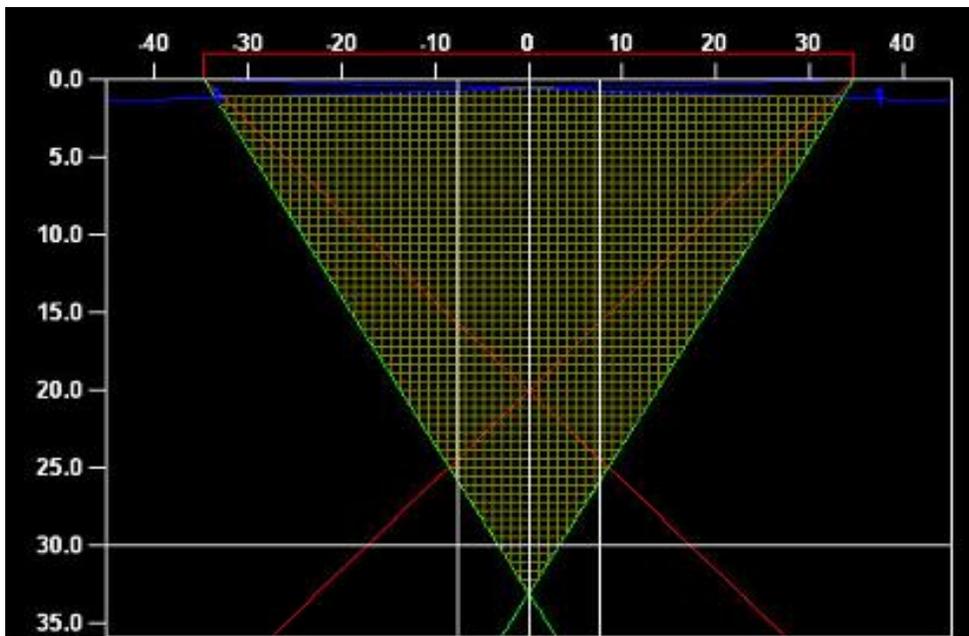


Figura 57.- Configuración de Junta Inspección 3

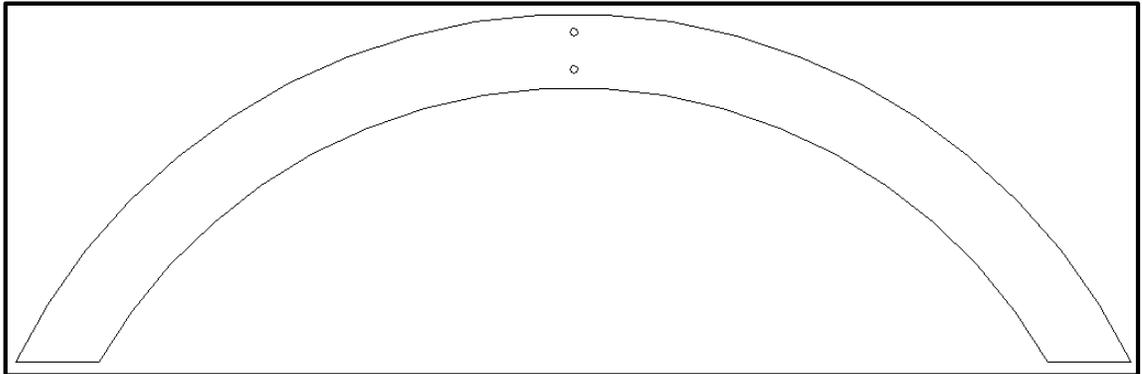


Figura 58.- Bloque de Referencia Inspección 3

Tabla 20

Datos del Bloque de Referencia Inspección 3

Datos del Bloque de Calibración	
Espesor	30 mm
Agujeros	Ø3 mm
Ubicación del 1 ^{er} agujero 1/4t	7.5 mm
Ubicación del 2 ^{do} agujero 3/4t	22.5 mm

Fuente: *Elaboración propia*

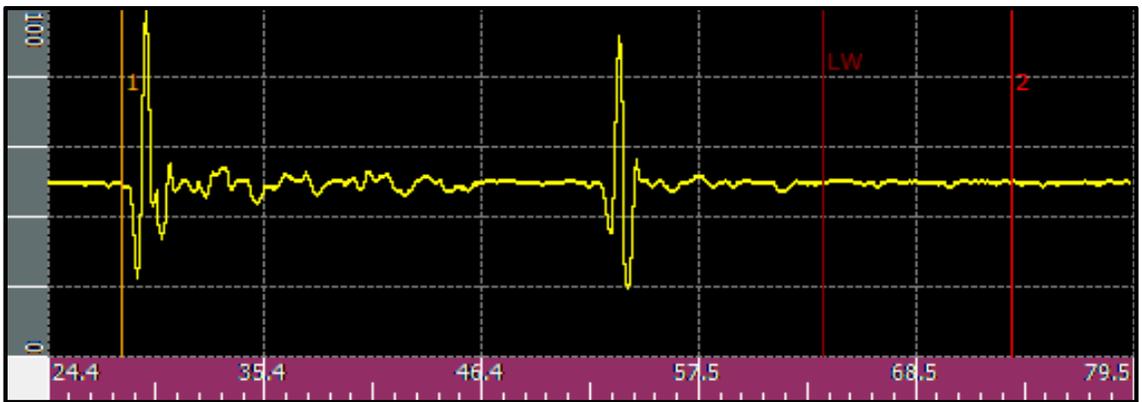


Figura 59.- Vista A-Scan Inspección 3

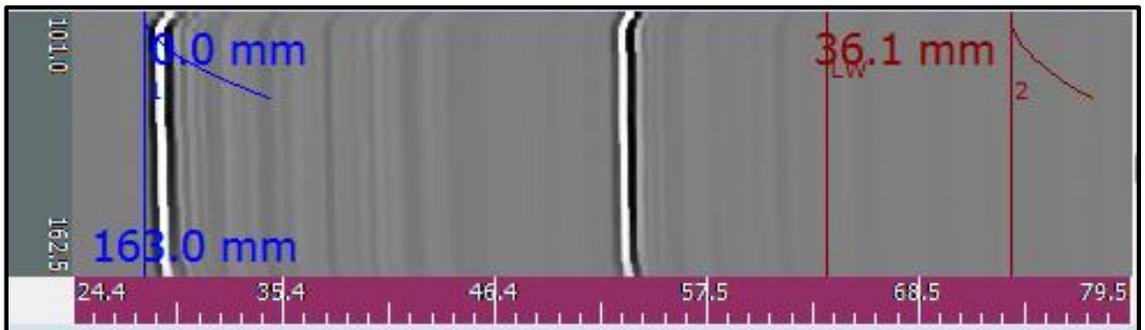


Figura 60.- Vista B-Scan Inspección 3

Tabla 21
Datos Evaluados Inspección 3

Datos de Evaluación	
Población	255 Unidades
Muestra	26 Unidades
Examinaciones Aceptadas	25 Unidades
Examinaciones Rechazadas	1 Unidades

Fuente: *Elaboración propia*

- Observaciones

Se utilizó la velocidad longitudinal y los resultados son aceptables.

Se detectan las dos ondas, superficial (LB) y eco de fondo (BW) y coinciden con los tiempos de vuelo respectivos.

La continuidad del eco de fondo en todo el recorrido, nos permitirá deducir si existe algún defecto interno y no sobresale a la superficie.

La no continuidad del eco de fondo, permite deducir que existe un defecto que obstaculiza la propagación de las ondas.

3.3.1.4 Inspección 4: Ø24" SDR 17, Espesor 36 mm

Tabla 22
Parámetros Insertados al Equipo Inspección 4

Parámetros Insertados al Equipo	
PCS o 2S	83 mm
d	18 mm
D	65 mm
f	24 mm
Dimensión de los Transductores	Ø10 mm
Frecuencia de los Transductores	5 MHz
Ángulo de Cuña	60°
Tipo de Material	HDPE
Velocidad Longitudinal	2460 m/s
Espesor	36 mm

Fuente: *Elaboración propia*

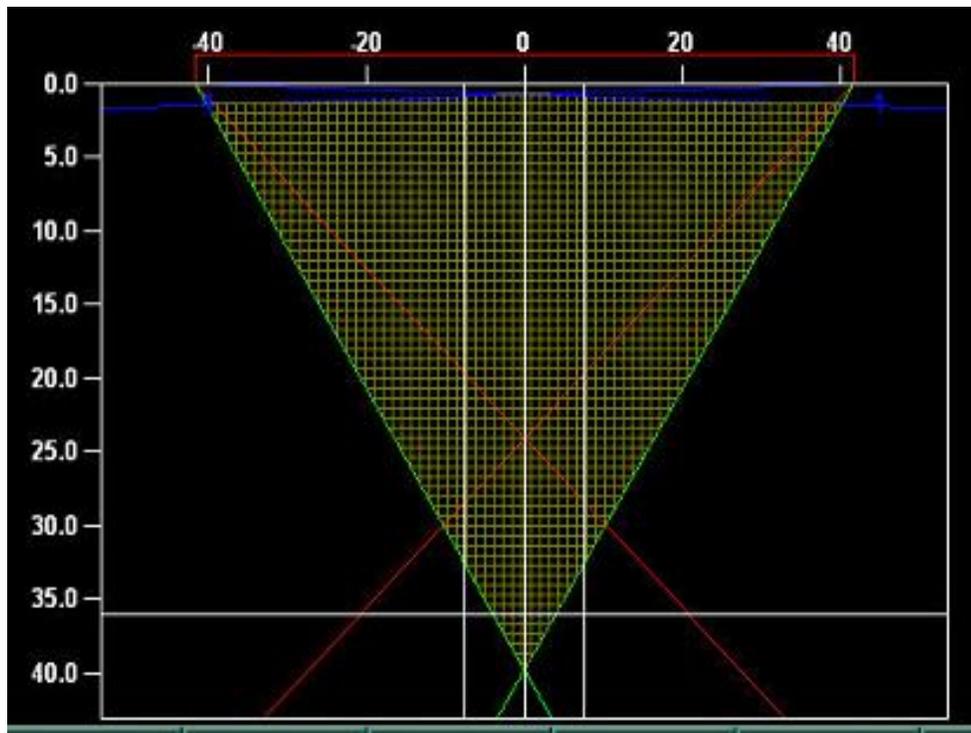


Figura 61.- Configuración de Junta Inspección 4

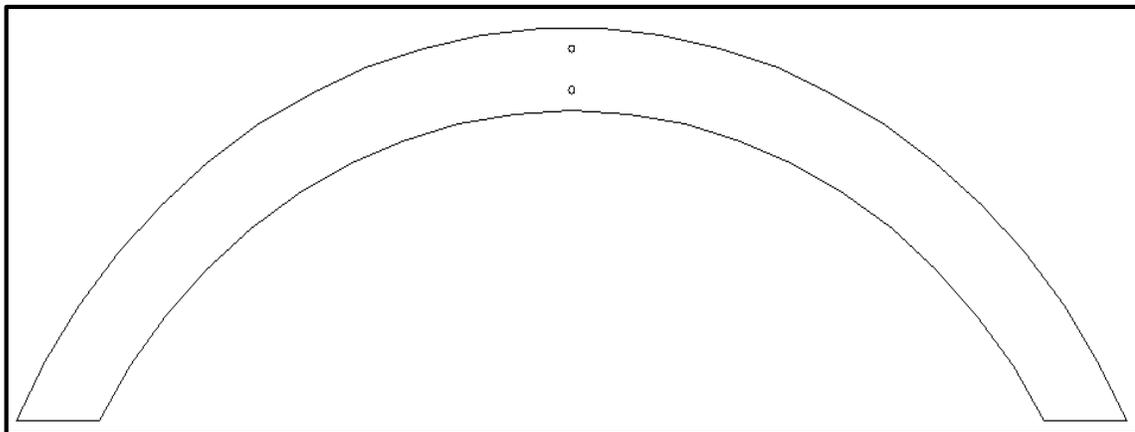


Figura 62.- Bloque de Referencia Inspección 4

Tabla 23

Datos del Bloque de Referencia Inspección 4

Datos del Bloque de Calibración	
Espesor	36 mm
Agujeros	Ø3 mm
Ubicación del 1 ^{er} agujero 1/4t	9 mm
Ubicación del 2 ^{do} agujero 3/4t	27 mm

Fuente: *Elaboración propia*



Figura 63.- Vista A-Scan Inspección 4

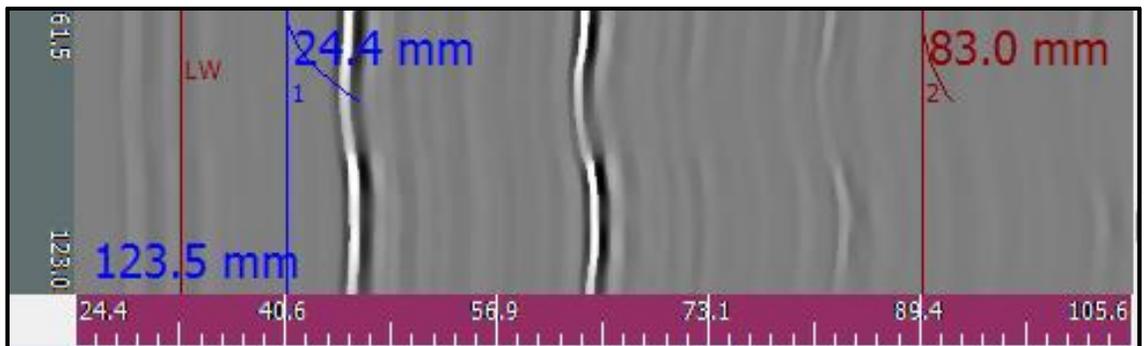


Figura 64.- Vista B-Scan Inspección 4

Tabla 24
Datos Evaluados Inspección 4

Datos de Evaluación	
Población	144 Unidades
Muestra	14 Unidades
Examinaciones Aceptadas	14 Unidades
Examinaciones Rechazadas	0 Unidades

Fuente: *Elaboración propia*

- Observaciones

Se utilizó la velocidad longitudinal y los resultados son aceptables.

Se detectan las dos ondas, superficial (LB) y eco de fondo (BW) y coinciden con los tiempos de vuelo respectivos.

La continuidad del eco de fondo en todo el recorrido, nos permitirá deducir si existe algún defecto interno y no sobresale a la superficie.

La no continuidad del eco de fondo, permite deducir que existe un defecto que obstaculiza la propagación de las ondas.

3.3.1.5 Inspección 5: Ø30" SDR 11, Espesor 70 mm

Tabla 25

Parámetros Insertados al Equipo Inspección 5

Parámetros Insertados al Equipo	
PCS o 2S (1 ^{ra} Zona)	162 mm
PCS o 2S (2 ^{da} Zona)	116 mm
d (1 ^{ra} Zona)	18 mm
d (2 ^{da} Zona)	15 mm
D (1 ^{ra} Zona)	144 mm
D (2 ^{da} Zona)	101 mm
f (1 ^{ra} Zona)	47 mm
f (2 ^{da} Zona)	58 mm
Dimensión de los Transductores (1 ^{ra} Zona)	Ø10 mm
Dimensión de los Transductores (2 ^{da} Zona)	Ø10 mm
Frecuencia de los Transductores (1 ^{ra} Zona)	5 MHz
Frecuencia de los Transductores (2 ^{da} Zona)	5 MHz
Ángulo de Cuña (1 ^{ra} Zona)	60°
Ángulo de Cuña (2 ^{da} Zona)	45°
Tipo de Material	HDPE
Velocidad Longitudinal	2460 m/s
Espesor	70 mm

Fuente: *Elaboración propia*

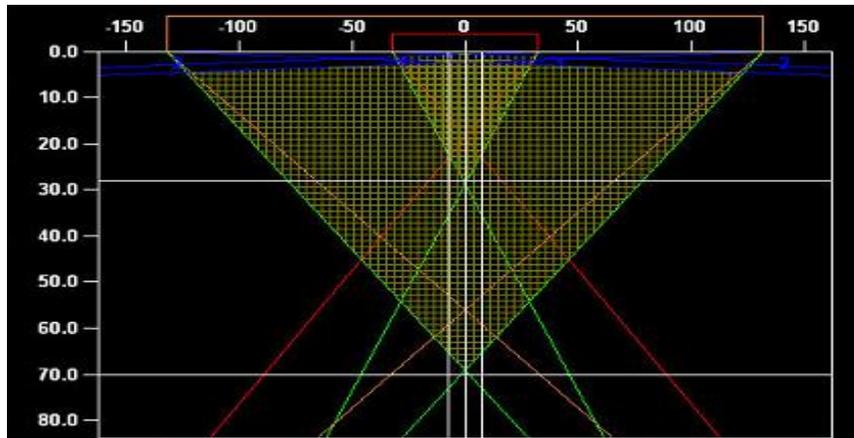


Figura 65.- Configuración de Junta Inspección 5

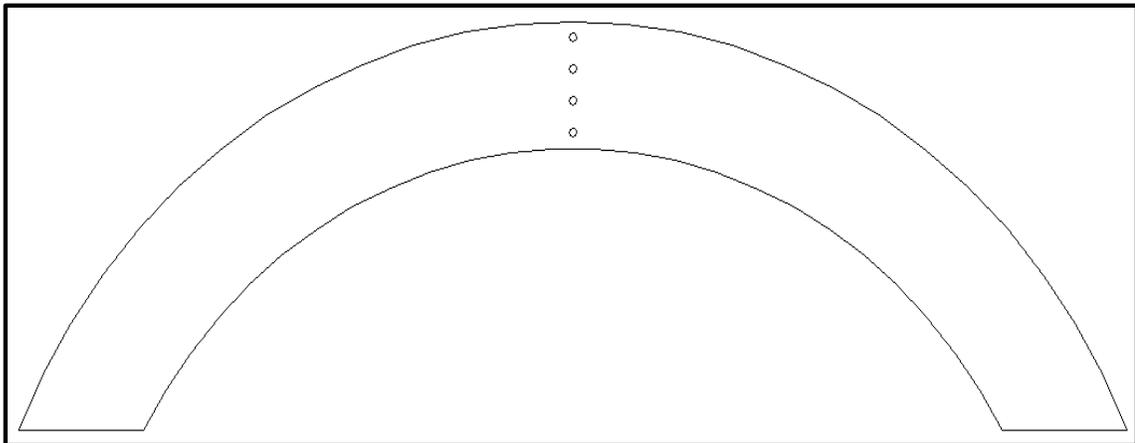


Figura 66.- Bloque de Referencia Inspección 5

Tabla 26
Datos del Bloque de Referencia Inspección 5

Datos del Bloque de Calibración	
Espesor	70 mm
Agujeros	Ø5 mm
Ubicación del 1 ^{er} agujero 1/4t ₁	8.75 mm
Ubicación del 2 ^{do} agujero 3/4t ₁	26.25 mm
Ubicación del 3 ^{er} agujero 1/4t ₂	8.75 mm
Ubicación del 4 ^{to} agujero 3/4t ₂	26.25 mm

Fuente: *Elaboración propia*

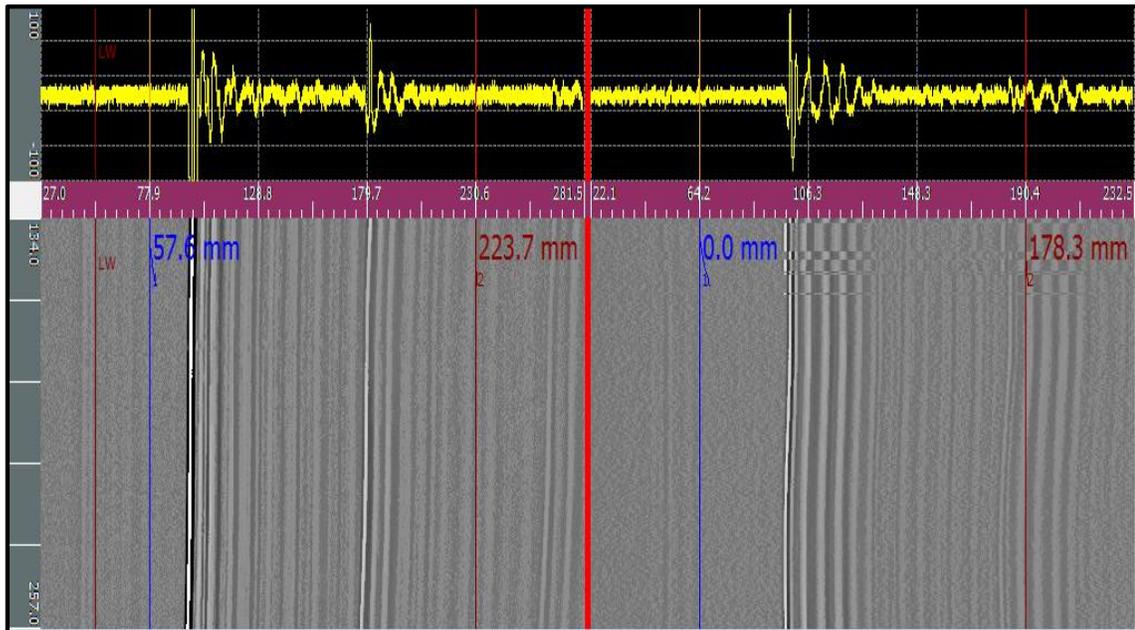


Figura 67.- Vista A-Scan y B-Scan Inspección 5

Tabla 27
Datos Evaluados Inspección 5

Datos de Evaluación	
Población	700 Unidades
Muestra	70 Unidades
Examinaciones Aceptadas	67 Unidades
Examinaciones Rechazadas	3 Unidades

Fuente: *Elaboración propia*

- Observaciones

Se utilizó la velocidad longitudinal y los resultados son aceptables.

Se detectan las dos ondas, superficial (LB) y eco de fondo (BW) y coinciden con los tiempos de vuelo respectivos.

La continuidad del eco de fondo en todo el recorrido, nos permitirá deducir si existe algún defecto interno y no sobresale a la superficie.

La no continuidad del eco de fondo, permite deducir que existe un defecto que obstaculiza la propagación de las ondas.

3.3.1.6 Inspección 6: Ø32" SDR 11, Espesor 74 mm

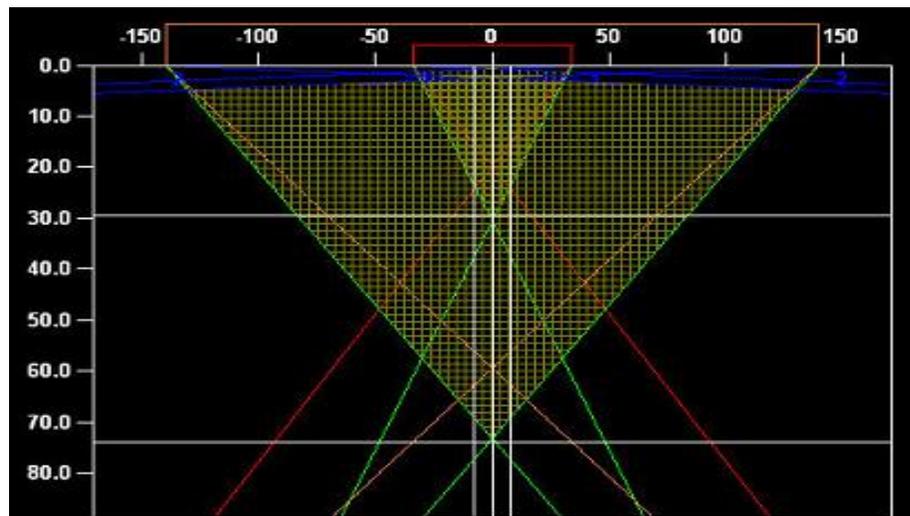


Figura 68.- Configuración de Junta Inspección 6

Tabla 28
Parámetros Insertados al Equipo Inspección 6

Parámetros Insertados al Equipo	
PCS o 2S (1 ^{ra} Zona)	170 mm
PCS o 2S (2 ^{da} Zona)	123 mm
d (1 ^{ra} Zona)	18 mm
d (2 ^{da} Zona)	15 mm
D (1 ^{ra} Zona)	152 mm
D (2 ^{da} Zona)	108 mm
f (1 ^{ra} Zona)	49 mm
f (2 ^{da} Zona)	62 mm
Dimensión de los Transductores (1 ^{ra} Zona)	Ø10 mm
Dimensión de los Transductores (2 ^{da} Zona)	Ø10 mm
Frecuencia de los Transductores (1 ^{ra} Zona)	5 MHz
Frecuencia de los Transductores (2 ^{da} Zona)	5 MHz
Ángulo de Cuña (1 ^{ra} Zona)	60°
Ángulo de Cuña (2 ^{da} Zona)	45°
Tipo de Material	HDPE
Velocidad Longitudinal	2460 m/s
Espesor	74 mm

Fuente: *Elaboración propia*

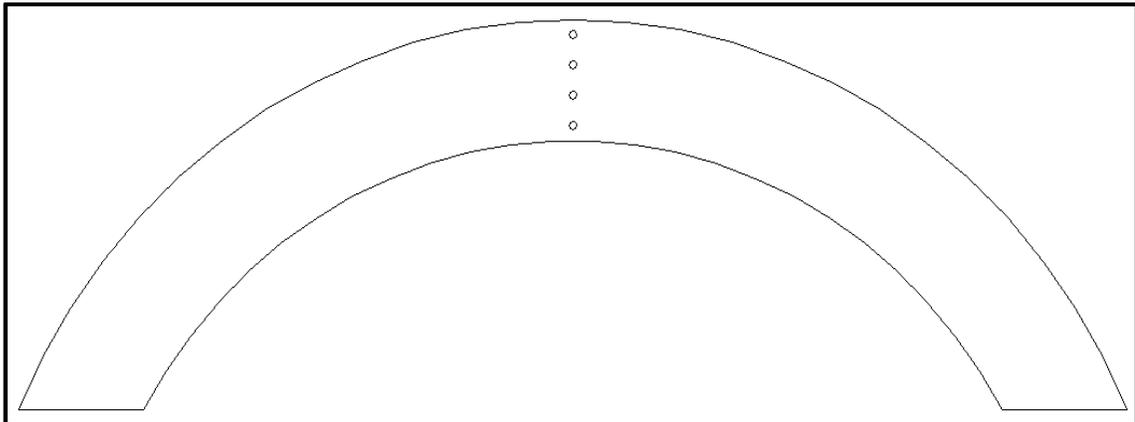


Figura 69.- *Bloque de Referencia Inspección 6*

Tabla 29
Datos del Bloque de Referencia Inspección 6

Datos del Bloque de Calibración	
Espesor	74 mm
Agujeros	Ø5 mm
Ubicación del 1 ^{er} agujero 1/4t ₁	9.25 mm
Ubicación del 2 ^{do} agujero 3/4t ₁	27.75 mm
Ubicación del 3 ^{er} agujero 1/4t ₂	9.25 mm
Ubicación del 4 ^{to} agujero 3/4t ₂	27.75 mm

Fuente: *Elaboración propia*

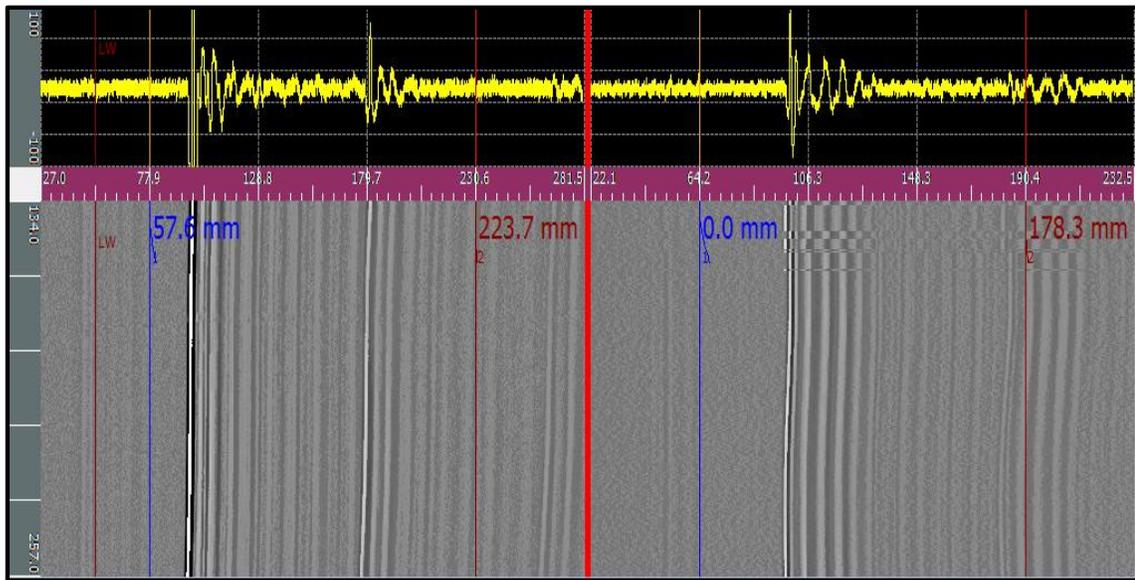


Figura 70.- Vista A-Scan y B-Scan Inspección 6

Tabla 30
Datos Evaluados Inspección 6

Datos de Evaluación	
Población	310 Unidades
Muestra	31 Unidades
Examinaciones Aceptadas	29 Unidades
Examinaciones Rechazadas	2 Unidades

Fuente: *Elaboración propia*

- Observaciones

Se utilizó la velocidad longitudinal y los resultados son aceptables.

Se detectan las dos ondas, superficial (LB) y eco de fondo (BW) y coinciden con los tiempos de vuelo respectivos.

La continuidad del eco de fondo en todo el recorrido, nos permitirá deducir si existe algún defecto interno y no sobresale a la superficie.

La no continuidad del eco de fondo, permite deducir que existe un defecto que obstaculiza la propagación de las ondas.

3.3.1.7 Ejemplo de Junta con Defecto



Figura 71.- Vista A-Scan y B-Scan con Defecto

- Observaciones

Se utilizó la velocidad longitudinal y los resultados son aceptables.

Se detectan las dos ondas, superficial (LB) y eco de fondo (BW) y coinciden con los tiempos de vuelo respectivos.

La continuidad del eco de fondo en todo el recorrido, permite deducir que el defecto es interno y no sobresale a la superficie.

Discontinuidades del eco de fondo, simétricas a la posición del defecto, sirven para deducir que se trata de una ausencia de fusión (LOF).

CONCLUSIONES

La técnica TOFD es muy adecuada para la caracterización de la morfología de los materiales metálicos y no metálicos, ya que permite generar imágenes (B-Scan) de fácil interpretación y la posibilidad de dimensionar los defectos con gran exactitud. En este proyecto, se inspecciono hasta 74 mm de espesor, obteniéndose datos muy favorables, realizando la caracterización de la morfología y/o defectos en tuberías de HDPE.

Los resultados (imágenes B-Scan) de las inspecciones realizadas sobre cada una de las juntas, permiten en forma general, aseverar de qué se trata de una técnica bastante fiable en la caracterización de la morfología de los materiales.

Los criterios de aceptación para la inspección, en el presente proyecto se basaron en la Norma ASME B31.3 Process piping. Esto sirve para delimitar las acciones y los recursos que se utilizarán a fin de aumentar la eficiencia y eficacia del procedimiento.

RECOMENDACIONES

El empleo de sistemas automáticos de adquisición de datos. En este proyecto, se hizo manualmente y se pudo constatar esa necesidad, ya que esta técnica requiere de muchas mediciones para obtener imágenes con mejores resoluciones.

Verificar que las cuñas y los transductores (mínimo 1 par de ellos), sean de las mismas características.

El uso de bloques de referencia, ya mostradas en: 3.3.2 Inspecciones de los Diferentes Espesores Mediante la Técnica TOFD.

La técnica TOFD, proporciona una altísima reducción en el tiempo de inspección en comparación a otras técnicas.

Cuando se usan transductores de menor frecuencia, la presencia de las alas hiperbólicas alrededor de la señal del defecto es inevitable, y para solucionar este inconveniente es necesario recurrir a un procesado diferido de las señales digitalizadas.

El uso de registros de imágenes TOFD con defectos conocidos para así poder aumentar el poder de confiabilidad a la hora de caracterizar los diferentes defectos.

Utilizar métodos de inspección complementarios, con la finalidad de obtener una información fidedigna, de las distintas discontinuidades que se pudieran presentar en una pieza o junta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Gómez de León. (2006). *END. Ultrasonido Nivel II*. Madrid: FC Editorial.
- [2] A. D. Restrepo Girón. (2006). *Generalidades sobre los ultrasonidos*. Ingenium.
- [3] C. Rodríguez González. (2012). *Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante Ensayos no Destructivos*. Santander.
- [4] Olympus NDT INC. (2011). *Ultrasonic Transducer Technical Notes*.
- [5] C. Rubio y O. Marrero. *Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos Automatizados de Inspección de Líneas de Tuberías*. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).
- [6] Olympus NDT. (2007). *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline*. Canada: Olympus NDT.
- [7] G. Baskaran, K. Balasubramaniam y C. Laksgmana Rao. (2006). *Shear-wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique*. NDT & E International.
- [8] A. Racionero Martínez. (2011). *Inspección de Soldadura. Técnicas TODF y Phased Array*. Ingeniería del Mantenimiento en Canarias.
- [9] Comité Europeo de Normalización, Norma UNE-EN 583-6. (2010). *Técnica por difracción de vuelo como método para la detección y dimensionamiento de las discontinuidades*.

- [10] SUPOR. *Super idea for ultrasonic inspection.*
- [11] ASME V. (2010). *Boiler & Pressure Vessel Committee on Nondestructive Examination, Appendix N-O.*
- [12] Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos. *Soldadura térmica en tuberías de polietileno (PE).*
- [13] Revinca, C. A. (2002). *Procedimiento de Inspección en Tuberías de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) en el Campo.*
- [14] ADEMinsa. (2013). *Procedimiento de Examinación de Uniones Soldadas y Termofusionadas por Ultrasonido Mediante la Técnica Time OF Flight Diffraction (TOFD), de Acuerdo al Código ASME Sección V-Art 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373-04.*
- [15] SIUI. *Operation Manual.*

ANEXOS

Se adjunta los siguientes documentos:

- Procedimiento de Examinación de Uniones Soldadas y Termofusionadas por Ultrasonido Mediante la Técnica Time OF Flight Diffraction (TOFD), de Acuerdo al Código ASME Sección V-Art 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373-04.
- Modelo de reporte.
- PQR.
- WPQ.
- Plano de ubicación.
- Resumen de juntas.

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01	
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Date:</i>	28/08/2013
		<i>Edition:</i>	1.0
		<i>Review N°:</i>	0.0
		<i>Page 1 de 24</i>	

PROCEDIMIENTO DE EXAMINACIÓN DE UNIONES SOLDADAS Y TERMOFUSIONADAS POR ULTRASONIDO MEDIANTE LA TÉCNICA TIME OF FLIGHT DIFFRACTION (TOFD), DE ACUERDO AL CÓDIGO ASME SECCIÓN V – ART. 4, APÉNDICE MANDATORIO III Y EL ESTÁNDAR ASTM E2373-04

Esta Página es el record de las revisiones de este procedimiento. Cada determinado tiempo una revisión debe ser realizada, sólo las páginas revisadas son reemplazadas. Remarcar las nuevas indicaciones y brindar una descripción de la revisión y modificaciones, no siendo estas una parte del presente procedimiento.

RESPONSABILIDADES	POSICIÓN	NOMBRE
Preparado por	Jefe de Operaciones – UN08 – ADEMINSA NDT Level III UT, VT, MT, PT CWI – AWS N° 11111551	_____ Ing. Luis Chirinos Martínez
Revisado y Aprobado por	Gerente General – ADEMINSA Group of Companies ASNT Level III N° 121763 UT, MT, PT, VT, ET, RT, IR, ML	_____ Ing. Alberto Reyna Otayza

Procedimiento demostrado por NDT Level III	
Procedimiento demostrado a Satisfacción de	
Certificado por el cliente	

TABLA DE REVISIONES								
REV.	DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS	FECHA DE APROBACIÓN	PREPARADO		REVISADO		APROBADO	
			NOMBRE	FIRMA	NOMBRE	FIRMA	NOMBRE	FIRMA
1	Aplicación	28/08/13	LChM		ARO		ARO	
DISTRIBUCIÓN								
COPIA N°		USUARIO					COPIA CONTROLADA	

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01	
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Date:</i>	28/08/2013
		<i>Edition:</i>	1.0
		<i>Review N°:</i>	0.0
		<i>Page 2 de 24</i>	

TABLA DE CONTENIDO

1.0. OBJETIVO	3
2.0. ALCANCE	3
3.0. RESPONSABILIDADES.....	3
4.0. DOCUMENTOS DE REFERENCIA.....	4
5.0. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	5
6.0. BASES DE APLICACIÓN.....	7
7.0. MATERIALES EXAMINADOS, PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE Y ACOPLAMIENTO ACÚSTICO	7
8.0. EQUIPAMIENTO	8
9.0. CALIBRACIÓN	11
10.0. EXAMINACIÓN	13
11.0. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO	15
12.0. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	18
13.0. DOCUMENTACIÓN	19
13.1. REGISTRO DE INDICACIONES	19
ANEXO I: INSTRUCTIVO DE INSPECCIÓN.....	21
ANEXO II MODELO DE PROTOCOLO DE INSPECCIÓN	22
ANEXO III MODELO DE REPORTE DIARIO	24

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 3 de 24</i>

1.0. OBJETIVO

- 1.1. El propósito de este procedimiento es describir en forma específica el desarrollo de la examinación ultrasónica mediante la técnica conocida como Time of Flight Diffraction (TOFD).
- 1.2. Describir la aplicación del método de inspección Ultrasónico mediante la aplicación de la técnica Pitch – Catch, utilizando TOFD para la examinación de uniones soldadas y termofusionadas a Tope de Penetración Completa, de acuerdo con la norma ASME Sección V, Art. 4, Apéndice Mandatorio III y el Estándar ASTM E2373 – Estándar Práctico para el uso de la Técnica de Ultrasonido TOFD.

2.0. ALCANCE

- 2.1. La aplicación de este procedimiento cubre la inspección de uniones soldadas a tope de penetración completa de planchas y tuberías de acero al carbono y aleaciones desde 3 plg de diámetro exterior con un rango de espesores de 9mm hasta 300mm
- 2.2. La aplicación de este procedimiento cubre la inspección de uniones termofusionadas a tope de penetración y fusión total de tuberías de HDPE (Polietileno de Alta Densidad) con espesores desde 9mm hasta 300mm.
- 2.3. Espesores de mayor y menor valor a los indicados en 2.1 y 2.2. pueden ser evaluados utilizando este procedimiento específico, si la técnica de inspección puede ser demostrada mediante una detección adecuada en mock-ups del mismo espesor de pared y geometría a las inspeccionadas.
- 2.4. Este procedimiento define los requerimientos generales, la técnica y el equipo a utilizar para la inspección de uniones soldadas y termofusionadas de acuerdo a los Códigos y Estándares indicados en los puntos 1.2 y 4.0.
- 2.5. Este procedimiento cubre la identificación, caracterización y dimensionamiento en ubicación, longitud y altura de las discontinuidades y/o defectos de soldadura, tales como fisuras (C), falta de fusión (LOF), falta de penetración (IP), Escorias (S), Porosidades (P), Desalineamientos (Hi-Lo), Laminaciones (L), etc.
- 2.6. Debido a las amplitudes de señal relativamente bajas que se utilizan en la técnica TOFD, el método se puede aplicar de forma rutinaria en los materiales con niveles relativamente bajos de atenuación y de dispersión de las ondas ultrasónicas. En general, la aplicación en componentes de acero al carbono aleados y de baja aleaciones y soldaduras es posible, pero también en aceros austeníticos de grano fino y de aluminio. Materiales de grano grueso y materiales con anisotropía significativa sin embargo, como hierro fundido, materiales de soldadura austeníticos y aleaciones de alto níquel, requerirán validación adicional y de procesamiento de datos adicional. Por mutuo acuerdo, una probeta de ensayo representativa con discontinuidades artificiales y / o naturales pueden ser utilizados para confirmar inspeccionabilidad.

3.0. RESPONSABILIDADES

3.1. REQUISITOS DEL PERSONAL:

- 3.1.1. La Empresa Constructora, o Fabricante deberá ser responsable de asegurarse que el personal de Ensayos No Destructivos (END) haya sido calificado y certificado de acuerdo con la Práctica Escrita del empelador (SGC-AD-PQCP), para la ejecución o validación de examinaciones de TOFD por el Código ASME Sección V u otro aplicable.
- 3.1.2. El personal que lleve a cabo la aplicación de este procedimiento deberá encontrarse, como mínimo, certificado como NDT Nivel II o Nivel III en UT, de conformidad con la Práctica Escrita de AHORRO DE ENERGÍA Y MANTENIMIENTO INDUSTRIAL SAC – ADEMINSAC (SGC-AD-PQCP).
- 3.1.3. El personal que lleve a cabo la aplicación de este procedimiento deberá tener conocimiento de la técnica de inspección, manejo adecuado del equipo y experiencia demostrada en la inspección de uniones soldadas y termofusionadas.

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 4 de 24</i>

3.2. REQUISITOS FÍSICOS: Los inspectores principales y los inspectores asistentes deberán haber aprobado un examen ocular con o sin lentes correctivos para comprobar agudeza visual cercana y de contraste de color, Jaeger J-2 a una distancia de 12 in a 17 in (300 mm a 430 mm). El examen ocular de todo el personal de inspección será requerido cada año o menos de ser necesario, para demostrar suficiencia.

3.3. RESPONSABILIDADES:

- 3.3.1. El Gerente de Aseguramiento y Control de la Calidad (QA/QC) deberá ser el responsable de la implementación y control del presente procedimiento.
- 3.3.2. El Inspector ASNT NDT Nivel III, deberá ser responsable de la administración total de las calificaciones y exámenes del personal NDT.
- 3.3.3. La responsabilidad de un inspector calificado NDT Nivel I, es la de llevar a cabo la inspección de acuerdo a los requerimientos e indicaciones del presente procedimiento, bajo la supervisión de un Inspector NDT Nivel II o NDT Nivel III.
- 3.3.4. La responsabilidad de los inspectores calificados como NDT Nivel II o NDT Nivel III, es la de interpretar, evaluar y reportar los resultados de la inspección, de acuerdo a los requerimientos e indicaciones del presente procedimiento, usando los criterios de aceptación correspondientes.
- 3.3.5. El inspector es competente en las técnicas del método de Ultrasonido (UT) para el cual está certificado, incluyendo la realización de las pruebas y la interpretación y la evaluación de los resultados, excepto que, cuando el método de examen consiste en más de una operación, él puede ser certificado sólo para una o más de estas operaciones.
- 3.3.6. El personal inspector deberá portar el equipo de protección personal e implementos, tales como: ropa de trabajo adecuada, lentes de seguridad, casco, guantes de látex, zapatos de seguridad, mascarillas para polvo y gases, tapones de oídos, bloqueador soldar, etc

3.4. Todas las uniones soldadas deberán ser inspeccionadas y reportadas por el Inspector de Control de ADEMINSAC NDT Nivel II en UT, bajo la supervisión del Jefe de Control de Calidad.

4.0. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- 4.1. PR SNT – TC – 1A Ed. 2006. Práctica Recomendada de Calificación y Certificación de Personal en Ensayos No Destructivos, Ed. 2006 (ASNT)
- 4.2. Código ASME BPV Sección IX (2010 Edition): Soldadura y Calificación de Soldadura
- 4.3. Código ASME BPV Sección V (2010 Edition), Art. 4: Ensayos No Destructivos - Examinación por Ultrasonido.
- 4.4. Código ASME B31.3 (2012 Edition). Tuberías de Procesos.
- 4.5. ASTM E2373 (2011 Edition): Estándar práctico para el uso de la técnica de ultrasonido Time of Flight Diffraction (TOFD).
- 4.6. BSI-BS7706 (2008 Edition): Guía para la calibración de la técnica de ultrasonido Time of Flight Diffraction (TOFD). Técnica para la detección, localización y dimensionamiento de defectos.
- 4.7. DDCEN/TS14751 (2004 Edtition): Uso del Time of Flight Diffraction (TOFD) para la examianción de soldaduras.
- 4.8. ASTM E-164: Práctica para la examinación de soldadura por ultrasonido de contacto.
- 4.9. ASTM E1065: Guía para la evaluación de las características de las Unidades de búsqueda de Ultraosnido.
- 4.10. ASTM E1324: Guía para la medición de algunas características electrónicas de los instrumentos de examinación ultrasónica.
- 4.11. ASTM F714 (2013 Edition): Estándar de especificación para tuberías plásticas de polietileno basados en el diámetro exterior.
- 4.12. ASTM E-1316: Terminología de las Inspección mediante Ensayos No Destructivos.
- 4.13. Code Case 2235. Código ASME BPV.

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 5 de 24</i>

4.14. Especificaciones técnicas del proyecto y planos de diseño.

5.0. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

- 5.1. **CÓDIGO:** conjunto de requisitos y condiciones generalmente aplicables a uno o más procesos de regulación de manera integral en un diseño, materiales, fabricación, construcción, montaje, instalación, prueba, reparación, operación y mantenimiento de los equipos de las instalaciones, estructuras y componentes específicos. Un conjunto de leyes, de una nación, ciudad, etc., dispuesto de forma sistemática para una fácil referencia
- 5.2. **ESTÁNDAR:** El término "estándar" usadas por AWS, ASTM, ASME, ANSI se aplica indistintamente a las especificaciones, códigos, métodos, prácticas recomendadas, definición de términos, clasificaciones y símbolos gráficos que han sido aprobados por el comité promotor de la sociedad técnica determinada y adoptado por esta sociedad. Algo establecido para su uso como una regla o base de comparación para medir o juzgar la capacidad, la cantidad, contenido, extensión, valor, calidad, etc.
- 5.3. **ESPECIFICACIÓN:** Una especificación es un estándar que describe clara y brevemente los requisitos esenciales y técnicos para un material, producto, sistema o servicio. Los procedimientos, métodos, clasificaciones y equipos que se utilizarán también están indicados con el fin de determinar si los requisitos especificados para el producto se han cumplido o no.
- 5.4. **SOLDADURA:** Una coalescencia localizada de metales o no metales producida ya sea por calentamiento de los materiales a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión, o mediante la aplicación de presión solamente y con o sin el uso de material de aporte.
- 5.5. **JUNTA:** La unión de los miembros o los bordes de los miembros que van a ser unidas o se han unido.
- 5.6. **JUNTA DE PENETRACIÓN COMPLETA (CJP):** condición de soldadura en la cual la soldadura del metal se extiende a través del espesor de la junta.
- 5.7. **INDICACIÓN:** Respuesta o evidencia de una discontinuidad resultante de la aplicación de un Ensayo no Destructivo.
- 5.8. **DISCONTINUIDAD:** Falta de continuidad; falta de cohesión (de unión); interrupción en la estructura física normal del material o producto. Una interrupción de la estructura típica de un material, tal como una falta de homogeneidad en sus características mecánicas, metalúrgicas, o física. Una discontinuidad no es necesariamente un defecto
- 5.9. **DEFECTO:** Discontinuidad cuyo tamaño, forma, orientación, ubicación o propiedades son inadmisibles para alguna norma específica. En particular, al realizar un ensayo no destructivo (END) se cataloga como defecto a toda discontinuidad o grupo de discontinuidades cuyas indicaciones no se encuentran dentro de los criterios de aceptación especificados por la norma aplicable.
- 5.10. **POROSIDAD:** Es una discontinuidad, típicamente es una cavidad, formada por atrapamiento de gas durante la solidificación del metal de soldadura o en un depósito por corte por aire. La discontinuidad que se forma es generalmente esférica pero puede ser alargada o irregular. Una causa común de las porosidades es la contaminación durante la soldadura.
- 5.11. **FUSIÓN INCOMPLETA:** Es una discontinuidad de soldadura en el que la fusión no se produjo entre el metal de soldadura y las caras de fusión o las zonas de soldadura adyacentes. Es el resultado de inadecuadas técnicas de soldadura, preparación inadecuada del metal o inadecuado diseño de junta.
- 5.12. **PENETRACIÓN INCOMPLETA:** Es una condición de la raíz de la junta en la cual el metal de soldadura no se extiende a través del espesor de la junta, es un área de inadecuada penetración y fusión, es una discontinuidad descrita como fusión incompleta de la junta. Penetración incompleta de la junta, puede generarse como resultado de un insuficiente aporte de calor, diseño de la unión inadecuada, o un control inadecuado del arco de soldadura.

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 6 de 24</i>

- 5.13. **FALTA DE LLENADO (UNDERFILL):** es una condición en la que la cara soldada o superficie de la raíz de una soldadura de ranura se extiende por debajo de la superficie adyacente del metal base. Es el resultado de la incapacidad del soldador para llenar completamente la unión soldada.
- 5.14. **SOLAPE:** Es una protuberancia de metal de soldadura sin fusionar más allá del borde de la soldadura o la raíz de la soldadura. El solape es una discontinuidad superficial que forma una muesca mecánica o concentrador de esfuerzos y casi siempre se considera rechazable. Dos causas comunes del solape pueden ser la velocidad de desplazamiento insuficiente y la preparación incorrecta de metal base.
- 5.15. **FISURAS:** Es definida como una fractura, un tipo de discontinuidad caracterizada por su terminación afilada y una alta relación de longitud y ancho a lo largo de la discontinuidad. Puede encontrarse en el metal de soldadura, debido al esfuerzo del material. Las fisuras a menudo se inician en las concentraciones de esfuerzos causados por discontinuidades o cerca de otras muescas mecánicas asociadas con el diseño de piezas soldadas.
- 5.16. **SOCAVACIONES:** Es una acanaladura o ranura fundida adyacente al material base al pie de la soldadura o raíz de la junta, que no es llenado por el metal de soldadura. Esta ranura crea una muesca mecánica, la cual es un concentrador de esfuerzos. Cuando el socavado es controlado dentro de los límites de las especificaciones, esta no es considerada un defecto de soldadura. Las socavaciones son generalmente asociadas con inadecuadas técnicas de soldadura, excesiva corriente durante el soldeo o ambos.
- 5.17. **INCLUSIÓN DE ESCORIA:** Son productos no metálicos resultantes de la disolución mutua del fundente y las impurezas no metálicas en algunos procesos de soldadura y soldadura fuerte. En general, las inclusiones de escoria se pueden encontrar en las soldaduras realizadas con cualquier proceso de soldadura por arco que emplea fundente como un medio de protección. En general, las inclusiones de escoria son resultado de las técnicas de soldadura inadecuadas, la falta de acceso adecuado para la limpieza de la junta, o inadecuada limpieza entre pasadas.
- 5.18. **ARC STRIKES:** Es una discontinuidad que consiste en un metal fundido localizado en cualquier parte, metal afectado térmicamente, o cambio en el perfil de la superficie de cualquier parte de una soldadura o metal base como resultado de un arco. El Arc Strikes es ocasionado cuando el arco de soldadura es iniciado en la superficie del metal base, fuera de la unión soldada, ya sea de forma intencional o accidentalmente. Cuando esto ocurre, hay un área localizada de la superficie del metal base que es fundida y rápidamente enfriada debido a la disipación de calor ocasionado por la mayor área del metal base. Los Arc Strikes no son deseados y son inaceptables, debido a que estos pueden contener fisuras.
- 5.19. **SALPICADURAS:** Consiste en partículas de metal expulsadas durante la fusión de la soldadura, estas no forman parte de la soldadura. Sólo las salpicaduras que se adhieren al metal de base es motivo de preocupación para el inspector visual. Normalmente, las salpicaduras no se consideran un defecto grave a menos que su presencia interfiere con las operaciones subsiguientes especialmente exámenes no destructivos, o la capacidad de servicio de la pieza. Puede indicar que el proceso de soldadura esté fuera de control, sin embargo.
- 5.20. **DISPLAY A-SCAN:** display de la amplitud de la señal ultrasónica como una función del tiempo.
- 5.21. **DISPLAY B-SCAN:** una vista en sección de los datos de inspección trazados, formados por el apilamiento de los A-Scan. (Algunos usuarios se refieren a apilarse los A-scan de las exploraciones no paralelas como D-scan y reservar las utilizadas con escaneos paralelos como B-scan.)
- 5.22. **FORMA DE ONDA DE RADIO FRECUENCIA (RF):** Una imagen A-Scan no rectificadas.
- 5.23. **BACK-WALL ECHO:** un reflejo especular de la parte posterior de la pared del componente que está siendo examinado (por lo general se asume que es una plancha).
- 5.24. **LATERAL WAVE:** una onda de compresión que viaja por la ruta más directa desde el transductor que transmite al transductor receptor en una configuración TOFD.

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 7 de 24</i>

- 5.25. **ESCANEO PARALELO:** una exploración mediante el cual de movimiento del par de transductores es paralelo al eje del haz ultrasónico. También llamado B-scan por algunos usuarios.
- 5.26. **ESCANEO NO PARALELO O ESCANEO LONGITUDINAL:** una exploración mediante el cual el movimiento del par de transductores es perpendicular al eje del haz ultrasónico.
- 5.27. **PCS:** abreviatura para el espaciamiento del centro de los transductores. Se refiere a la distancia entre los puntos de salida marcadas de un par de transductores de TOFD para una aplicación específica.
- 5.28. **ZONA MUERTA:** zona donde las indicaciones pueden ser enmascaradas por la presencia de señales de origen geométrico.
- 5.29. **ZONA MUERTA DE LA SUPERFICIE DE ESCANEO:** zona muerta en donde las indicaciones pueden ser oscurecidas por el eco de interfaz (onda lateral)
- 5.30. **ZONA MUERTA DEL ECO DE LA PARED DE FONDO:** zona muerta en donde las señales pueden ser oscurecidas por la presencia del eco de la pared de fondo.

6.0. BASES DE APLICACIÓN

- 6.1. **CALIFICACIÓN DEL PERSONAL:** Si se especifica en el acuerdo contractual, el personal que realiza las inspecciones del presente procedimiento deberán ser calificados de acuerdo a una práctica o estándar de calificación de personal END reconocido nacional o internacionalmente.
- 6.2. **PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE:** los criterios de preparación de la superficie durante la pre inspección deben realizarse en conformidad con el ítem 7.2. del presente procedimiento a menos que se especifique lo contrario.
- 6.3. **TIEMPO DE INSPECCIÓN:** El tiempo de la inspección deberá ser determinado por las partes contratantes y en conformidad con la etapa de fabricación o condiciones de servicio.
- 6.4. **ALCANCE DE LA EXAMINACIÓN:** El alcance de la inspección deberá ser adecuado para inspeccionar el volumen de la soldadura más la zona afectada por el calor a menos que se especifique lo contrario.
- 6.5. **CRITERIOS PARA LA PRESENTACIÓN DE INFORMES Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN:** criterios para la presentación de informes con los resultados obtenidos de las inspecciones deben realizarse en conformidad con el ítem 12.0, a menos que se especifique lo contrario. Dado que los criterios de aceptación no se especifican en este procedimiento, deben ser especificados en el acuerdo contractual.
- 6.6. **RE-INSPECCIÓN DE LOS ELEMENTOS REPARADOS/REPROCESADOS:** La re-inspección de elementos reparados/reprocesados no se aborda en este procedimiento y, si es necesario se especificarán en el acuerdo contractual

7.0. MATERIALES EXAMINADOS, PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE Y ACOPLAMIENTO ACÚSTICO

- 7.1. La técnica de TOFD se puede aplicar a ambos metales y no metales. Los mejores resultados se tuvieron en materiales isótropos de grano fino con baja atenuación incluyendo algunas aleaciones austenítico de fino grano y aluminio. Con validación procedimientos adecuados, Conforme a las partes contratantes, los materiales más gruesos de grano anisótropos también pueden ser examinadas usando TOFD. Estos por lo general requieren modificaciones adicionales a las frecuencias y procesamiento de señal digital.
- 7.2. El área de escaneado debe estar libre de las salpicaduras de soldadura y otras condiciones que pueden interferir con el movimiento de los transductores, el acoplamiento líquido, o la transmisión de energía acústica en el material. Cualquier condición de la superficie, tales como la geometría, de revestimiento, y así sucesivamente, lo que impide el examen ultrasónico se observó para la acción correctiva antes del escaneo.

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 8 de 24</i>

- 7.3. La temperatura de la superficie de escaneo deberá de encontrarse entre 0°C a 40°C
- 7.4. La técnica TOFD puede ser utilizado con técnicas de inmersión, de contacto o Gap. Elementos individuales o transductores de arreglo de fases piezoeléctricos graduales pueden ser utilizados. EMAT u otros transductores no estándar también se pueden utilizar con los procedimientos de validación adecuados acordados para las partes contratantes.
- 7.5. El acoplamiento acústico se puede conseguir mediante el uso de un medio adecuado para el propósito y compatible con el material siendo examinado. Agua, geles de acoplamiento o pastas, grasas y aceites se utilizan normalmente. Aditivos para el agua como agente humectante para el medio ambiente-seguro e inhibidores de la corrosión se pueden utilizar para mejorar el acoplamiento acústico y proteger la pieza de examen. Para el examen, donde temperaturas ambiente por debajo de 0°C [32°F] alcohol metílico o medios similares pueden ser utilizados. Para el examen a temperaturas elevadas la superficie de examen o transductores pueden requerir enfriamiento o acopladores de alta temperatura de diseño especial. El medio de acoplamiento seleccionado deberá proporcionar un examen uniforme y fiable en el rango de temperatura de uso previsto. Acoplante y escaneo condiciones, incluyendo la temperatura, utilizados para la calibración será el mismo que el utilizado en el examen.

8.0. EQUIPAMIENTO

8.1. REQUISITOS DE LOS INSTRUMENTOS:

- 8.1.1. **Instrumento.** El instrumento deberá proporcionar una presentación exploración A-Scan lineal, tanto para la creación de parámetros de escaneo y para el análisis de señales. La linealidad del instrumento debe ser tal que la precisión de la amplitud o el tiempo indicado sea de $\pm 5\%$ de la escala real de amplitud o tiempo. El generador de impulsos de ultrasonidos puede proporcionar voltaje de excitación por el tono de la ráfaga, unipolar, o de onda cuadrada bipolar. El ancho del pulso será ajustable para permitir optimizar la amplitud del pulso y su duración que es variable. El ancho de banda del receptor ultrasónico deberá ser al menos igual a la de la frecuencia nominal del palpador y de tal manera que el ancho de banda de -6dB del transductor no caiga fuera del ancho de banda de -6dB del receptor. El control de Ganancia del receptor deberá estar disponible para ajustar la amplitud de la señal en incrementos de 1dB o menos. Pre-amplificadores pueden ser incluidos en el sistema. La conversión analógica a digital de las formas de onda tendrá velocidades de muestreo de al menos cuatro veces mayor que la de la frecuencia nominal de la sonda. Cuando el procesamiento de la señal digital se llevará a cabo en los datos en bruto, esto aumentará a ocho veces la frecuencia nominal del transductor.
- 8.1.2. **Visualización de datos y grabación.** La visualización de datos deberá permitir la visualización del A-scan no rectificado a fin de situar el inicio y la longitud de una puerta que determina el alcance del A-scan de base de tiempo que se graba. El equipo debe permitir el almacenamiento de todas las exploraciones de las compuertas A-Scan en medio de almacenamiento magnético u óptico. El equipo debe proporcionar una vista en sección de la soldadura con un mínimo de 64 niveles de escala de grises. (El almacenamiento de sólo imágenes seccionales sin las formas de onda de RF A-scan subyacentes no es aceptable.) Software para pantallas TOFD incluirán algoritmos para linealizar cursores o la base de tiempo de forma de onda para permitir la profundidad y extensión estimaciones verticales. Además de almacenamiento de datos de forma de

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 9 de 24</i>

onda incluyendo la amplitud y detalles de base de tiempo, el equipo deberá almacenar también información de posición que indica la posición relativa de la forma de onda con respecto a la forma de onda adyacente(s), es decir, la posición codificada.

8.2. UNIDADES DE BÚSQUEDA

8.2.1. **General.** Transductores de ultrasonido se ajustarán a los siguientes requisitos mínimos:

- a. Dos transductores deberán ser utilizados en un arreglo pitch – catch (emisor – receptor) (par de TOFD).
- b. El par de transductor de TOFD deberá tener la misma frecuencia nominal.
- c. El par de transductores TOFD tendrá la misma dimensión de sus elementos
- d. La duración del pulso en el transductor no deberá sobrepasar 2 ciclos, medidos al nivel de 20 dB por debajo del nivel máximo de respuesta.
- e. Los transductores pueden ser enfocados o desenfocados. Transductores desenfocados se recomiendan para la detección y transductores enfocados son recomendados para una mejor resolución para el dimensionamiento.
- f. Los transductores pueden ser un solo elemento o de arreglo de fase (PA).
- g. La frecuencia nominal será de 2 MHz a 15 MHz serán usados, a menos que otras variables, como la estructura de grano del material de producción, requieren el uso de otras frecuencias para asegurar la penetración adecuada o mejor resolución.

8.3. BLOQUES DE CALIBRACIÓN.

8.3.1. **Reflectores.** Agujeros perforados laterales (SDH) deberán ser usados para confirmar la adecuada configuración de la sensibilidad.

8.3.2. **Bloques de Calibración Básicos.** La configuración del bloque de calibración básico y la ubicación de sus reflectores deberán ser como los mostrados en la Fig. 1. Un mínimo de dos agujeros por zona, si la soldadura está dividida en múltiples zonas, es requerido. Ver la Fig. 2 para el ejemplo de dos zonas de inspección. La medida del bloque y localización de los reflectores deberá ser la adecuada para confirmar la adecuada configuración de la sensibilidad para los haces de ángulos usados.

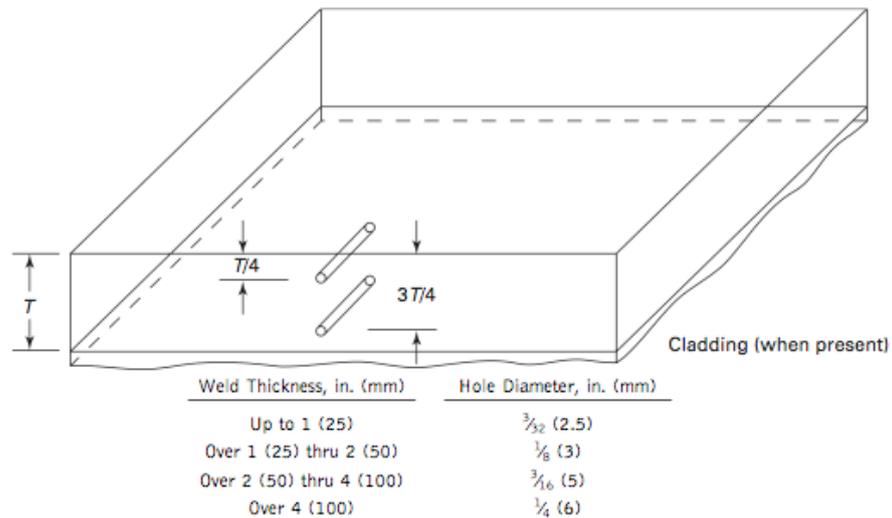
8.3.3. El bloque de calibración de referencia debe tener las dimensiones suficientes para garantizar el adecuado movimiento de los transductores sobre la superficie de examianción en la dirección del escaneo a realizarse sobre la pieza de evaluación. Se debe garantizar que exista libre recorrido del encoder sobre la superficie del bloque para registrar al menos 25 a 30mm (1.0 a 1.25in) de distancia de inspección.

8.3.4. **Espesor del Bloque.** El espesor del bloque de calibración deberá ser de al menos $\pm 10\%$ del espesor nominal de la pieza a ser examinada para espesores hasta de 4 in (100mm) o ± 0.4 in (10mm) para espesores sobre las 4 in (100mm). Alternativamente, un bloque más grueso puede utilizarse siempre que el tamaño reflector de referencia se base en el espesor a ser examinado y un número adecuado de orificios exista para cumplir con los requisitos de 8.3.2.

8.3.5. **Rango y Uso del Bloque.** Los requerimientos de T-434.2.3 del Código ASME Art. 4, no son aplicados a la técnica de TOFD.

8.3.6. **Bloques Alternativos.** Los requerimientos de T-434.2.4 del Código ASME Art. 4, no son aplicados a la técnica de TOFD.

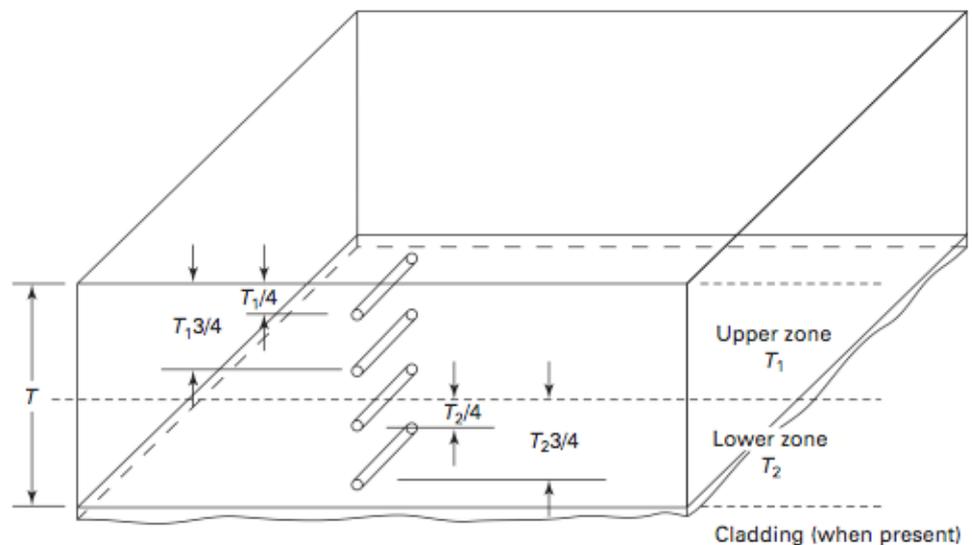
8.3.7. **Bloques de Calibración de Tuberías.** Los requerimientos de T-434.3 del Código ASME Art. 4, no son aplicados a la técnica de TOFD.



GENERAL NOTES:

- (a) Holes shall be drilled and reamed 2 in. (50 mm) deep minimum, essentially parallel to the examination surface.
- (b) *Hole Tolerance.* The tolerance on diameter shall be $\pm \frac{1}{32}$ in. (± 0.8 mm). The tolerance on location through the block thickness shall be $\pm \frac{1}{8}$ in. (± 3 mm).
- (c) All holes shall be located on the same face (side) of the block and aligned at the approximate center of the face (side) unless the indication from one reflector affects the indication from another. In these cases, the holes may be located on opposite faces (sides) of the block.
- (d) When the weld is broken up into multiple zones, each zone shall have a $T_1/4$ and $T_2/4$ side-drilled hole, where T_1 is the zone thickness.

Figura 1. Bloque de Referencia de TOFD



GENERAL NOTES:

- (a) T_1 equals the thickness of the upper zone.
- (b) T_2 equals the thickness of the lower zone.

Figura 2. Ejemplo de Bloque de Referencia para dos zonas de Inspección

8.4. MECANISMOS.

8.4.1. Sistemas mecánicos de posición deben ser utilizados para asegurar que el espaciamiento de los transductores se mantienen a una distancia fija. Los mecánicos de traslado de los

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 11 de 24</i>

transductores también se asegurarán de que la alineación con el eje de exploración previstos en la pieza de examen se mantenga.

- 8.4.2. El movimiento de los transductores se puede conseguir utilizando medios motorizados o manuales y el soporte mecánico para los transductores deberá estar equipado con un codificador de posición (encoder) que se sincroniza con el muestreo de los A-scan.

9.0. CALIBRACIÓN

9.1. CALIBRACIÓN PARA PLANCHAS

- 9.1.1. **Bloque de Calibración.** La calibración deberá ser realizada utilizando el bloque de calibración mostrados en la Fig. 1 o en el material a ser examinando.
- 9.1.2. **Calibración.** La configuración de los transductores de TOFD sobre la superficie a ser utilizada para la calibración y la configuración del control de ganancia para la configuración de la amplitud de la onda lateral la cual deberá encontrarse entre 40% a 90% de la Altura total de la pantalla (FSH) y el nivel del ruido (grass) será menor que 5-10% FSH. Este es el seteo de la referencia de sensibilidad. Para múltiples zonas de examinación cuando la onda lateral no es mostrada o es apenas perceptible ajuste el control de ganancia basado únicamente en el nivel de ruido (grass).
- 9.1.3. **Confirmación de la Sensibilidad.** Escanee el bloque de calibración sobre la zona con presencia de los SDH, posicionando los agujeros en el centro de los dos transductores, el nivel de referencia de la sensibilidad se configurará de acuerdo a 9.1.2. Las respuestas de los SDH de la zona requerida será de un mínimo de 6dB por encima del ruido de grano y se pondrán de manifiesto en la pantalla digitalizada en escala de grises.
- 9.1.4. **Examinación de Múltiples Zonas.** Cuando una soldadura es dividida en múltiples zonas de inspección, repetir lo indicado en 9.1.2 y 9.1.3 para cada par de transductores de TOFD. Adicionalmente, se deberá detectar el SDH más cercano a la zona adyacente.
- 9.1.5. **Confirmación del Ancho de cobertura.** Dos escaneos adicionales a los indicados en 9.1.3 deberán ser realizados con los transductores en offset a cada lado del borde de la soldadura de la zona correspondiente $\pm 1/2$ pulgada (13mm) de los transductores. Si no se detectan todos los agujeros necesarios, dos exploraciones offset adicionales son requeridos con los transductores en offset por la distancia(s) identificada anteriormente. Ver Fig. 3 como ejemplo.
- 9.1.6. **Encoder.** Los enconders deberán ser calibrados de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y confirmados por el movimiento de una mínima distancia de 20 in (500mm) y la distancia mostrada en la pantalla deberá ser $\pm 1\%$ de la distancia actual movida.

9.2. CALIBRACIÓN PARA TUBERÍAS

- 9.2.1. La inspección de uniones soldadas de componentes diferentes a plachas planas (tuberías, o zonas curvadas) requieren configuraciones adicionales, el registro y detección de discontinuidades debe ser demostrado.
- 9.2.2. Las principales configuraciones y requerimientos de TOFD para inspección de planchas planas pueden ser usadas para la examinación de otras geometrías. Sin embargo la medición e interpretación de los resultados e indicaciones puede ser más complicado. Las consideraciones de la inversión de las fases juegan una parte importante en como la señal es evaluada para la estimación de la medida y profundidad de la indicación
- 9.2.3. Cuando la pieza de examinación es curvada el diámetro del bloque de referencia deberá encontrarse entre 0.9 a 1.5 del diámetro de la parte a ser examinada para curvaturas por debajo de 0.3m (12in) para curvaturas más grandes de 0.3m (12in) de diámetro el bloque de referencia puede ser plano. Otras consideraciones al maquinar y coincidir la curvatura del bloque de referencia para la curvatura de la pieza de examen, se hará cuando la

zapata de refracción sea mecaniza para que coincida con la curvatura de la pieza de examinación.

9.2.4. Escaneo desde una Superficie Cóncava. Esta configuración introduce el concepto de la onda lateral como una onda creeping (Ver Figura 4.) En estas aplicaciones se tiene la condición de que la es haz refractado está en modo de compresión.

9.2.5. Escaneo desde una Superficie Convexa. Esta configuración introduce la onda lateral como una combinación de las ondas de compresión y de creeping debido al potencial de una onda creeping directa y una superficial a lo largo de la superficie de examinación (cuando el mode de refracción es en compresión). Ver Figura 5.

9.3. **CONFIRMACIÓN DEL ENCODER.** Una verificación de la calibración se realizará a intervalos que no excedan de un mes o antes del primer uso a partir de entonces, hacer moviendo el codificador a lo largo de una distancia mínima de 20 pulgadas (500 mm) y la distancia que se muestra sea $\pm 1\%$ de la distancia acutal de trasladó .

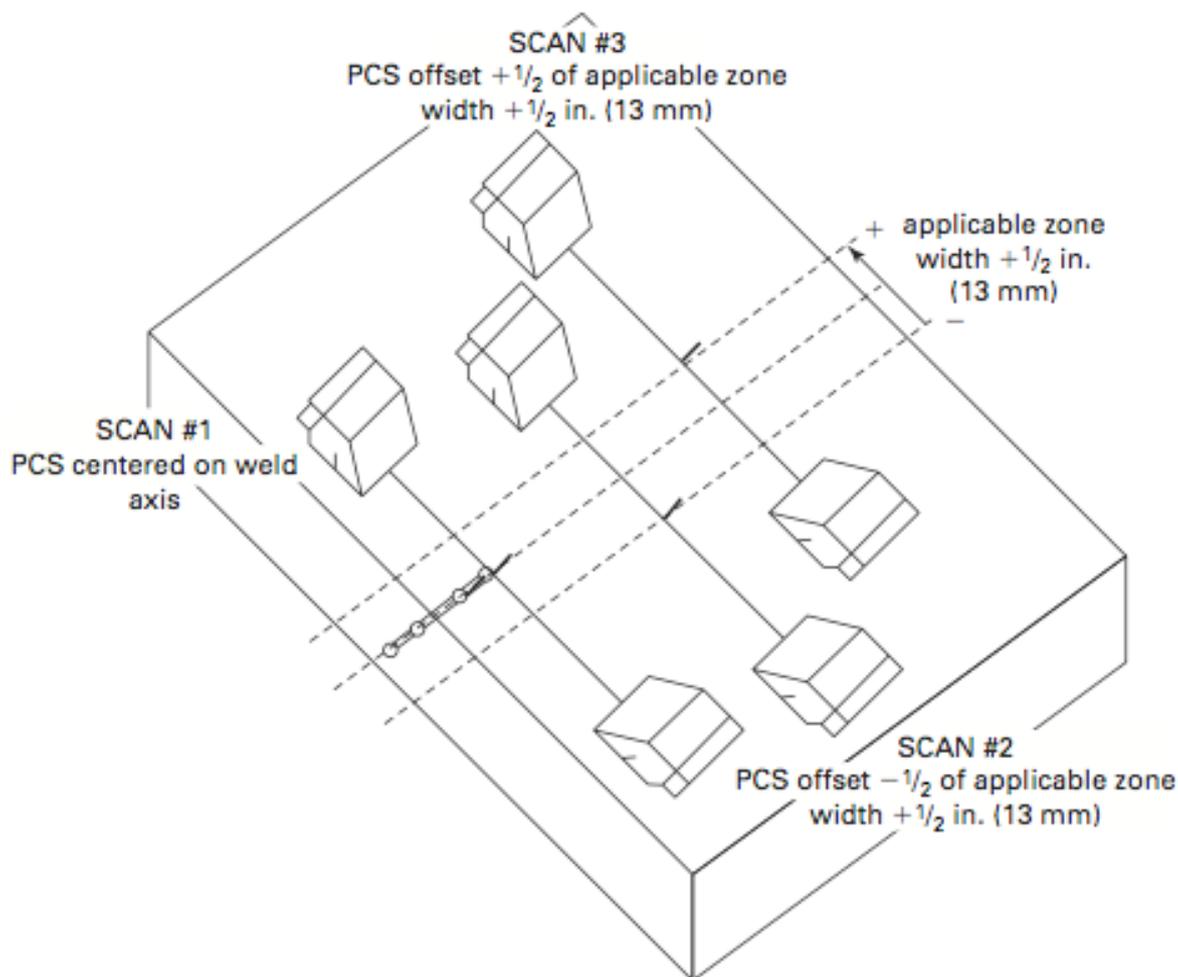


Figura 3. Ejemplo de Escaneo Offset

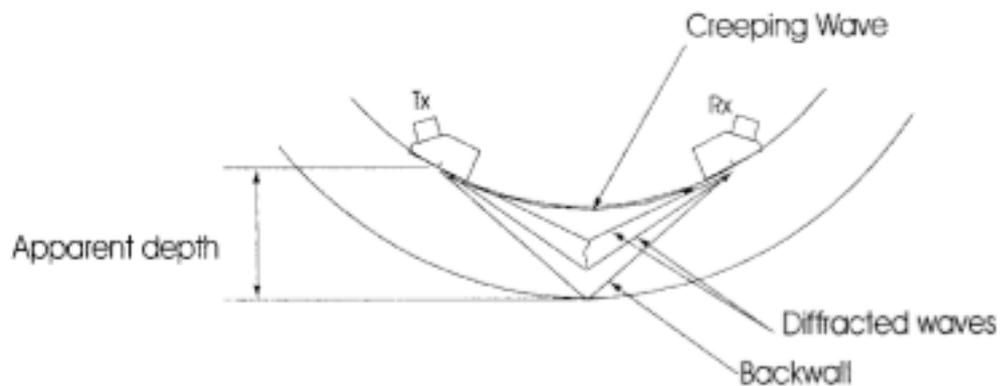


Figura 4. Examinación de TOFD desde una Superficie Cóncava

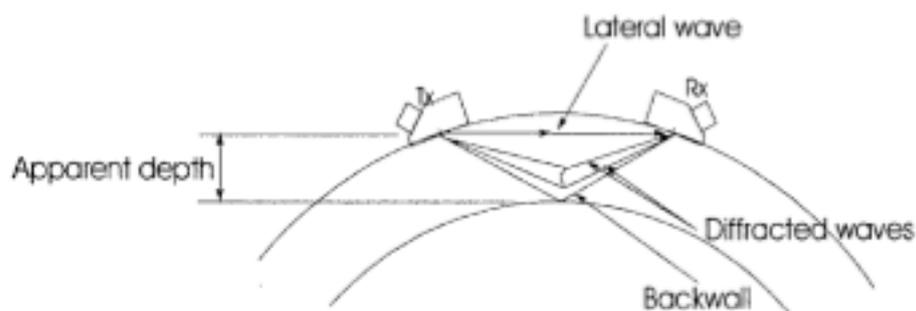


Figura 5. Examinación de TOFD desde una Superficie Convexa

10.0. EXAMINACIÓN

- 10.1. **COBERTURA DE LA EXAMINACIÓN:** El volumen que se va a escanear se examinará con el par de transductores de TOFD centrados y en posición transversal al eje de soldadura y luego moviendo el par de transductores en paralelo y a lo largo del eje de la soldadura. Si se requieren exploraciones de compensación debido a la anchura de la soldadura, repetir la exploración inicial con la diferencia respecto a un lado del eje de soldadura y de nuevo con el desplazamiento hacia el lado opuesto de la primera exploración de desplazamiento de sondas.
- 10.2. **TRASLAPE:** El mínimo traslape entre escaneos adyacente deberá ser de 1 in (25mm).
- 10.3. **EXAMINACIÓN DE MÚLTIPLES ZONAS.** Cuando una soldadura es dividida en múltiples zonas, repetir lo indicado en 9.1. para cada una de las zonas de soldadura.
- 10.4. **GRABACIÓN DE DATOS (REGIÓN ACOTADA).** Se registrará la señal no rectificado (RF forma de onda) A-scan. La región acotada A-scan deberá ser configurada para que inicie justo antes de la onda lateral y, como mínimo, no termina hasta todas las primeras señales de la pared de fondo con una previsión de espesor y variaciones de desajuste, sean grabadas. Los datos útiles se pueden obtener a partir de modos de conversión de señales, por lo tanto, el intervalo de la primera pared de fondo y la señal de la de pared en modo convertida también se incluirá en los datos recogidos cuando sea requerido por la referencia del código.
- 10.5. **REFLECTORES TRANSVERSALES A LA COSTURA DE SOLDADURA.** Un examen haz angular se realizará de acuerdo con T-472.1.3 del Código ASME Sección V, Art. 4; para reflectores transversales al eje de soldadura a menos que la sección de referencia del código especifique una examinación con TOFD. En estos casos, la posición de cada par de transductores de TOFD es esencialmente paralela al eje de soldadura y se deberá mover el par de transductores a lo largo y hacia abajo el eje de soldadura. Si el refuerzo de soldadura no es amolado, posicionar los transductores en el material de la plancha adyacente lo más paralelo al eje de soldadura como sea posible.

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 14 de 24</i>

- 10.6. **EXAMINACIÓN COMPLEMENTARIA DE LA ONDA TRANSVERSAL.** Debido a la presencia de la onda lateral y pared posterior, las señales de indicación, los defectos que ocurren en estas zonas pueden no ser detectados. Por lo tanto, las superficies cerca de la soldadura (caras, es decir, tanto arriba y abajo) serán examinadas mediante haz angular de acuerdo a lo indicado en el Artículo 4 los requisitos con los ángulos escogidos que están más cerca de ser perpendicular a las líneas de fusión. Este examen se puede realizar de forma manual o mecanizada, si es mecanizada, los datos serán recopilados en conjunto con el examen TOFD.
- 10.7. **SEPARACIÓN DEL MUESTREO DE DATOS.** Un espaciado de muestra máximo de 0,040 pulgadas (1 mm) se utiliza entre los A-scan recogidos para espesores menores de 2 pulgadas (50 mm) y un espaciado de muestra de hasta 0,080 pulgadas (2 mm) se puede utilizar para espesores mayores mayor de 2 pulgadas (50 mm).
- 10.8. **LÍNEA DE DATOS FALTANTES.** Líneas perdidas en la pantalla no excederán del 5% de las líneas de exploración para ser recogidos, y las líneas no adyacentes serán perdidas.
- 10.9. **MEDIDA DE LOS DEFECTOS E INTERPRETACIÓN.** Cuando se requiere el dimensionamiento de la altura del defecto, después de que el sistema sea calibrado según 9.0, se realizará un recorrido libre en el bloque de calibración y la profundidad de la reflexión de retorno de pared calculado por el sistema deberá estar dentro de 0.04 pulgadas (1mm) del espesor real. Para los exámenes de zona múltiple donde la pared del fondo no se muestra o apenas es perceptible, se puede usar un agujero perforado lateral u otro reflector de referencia de profundidad conocida en el bloque de calibración. Ver Apéndices Nonmandatory L y N del Código ASME Sección V, Art. 4; para la información adicional del tamaño del defecto y su interpretación. La interpretación final se hará sólo después de que todos los ajustes de parámetros de la pantalla (es decir, el contraste, el brillo, eliminación de lateral y la pared posterior y procesamiento SAFT, etc) se han completado.
- 10.9.1. *Posición de las Indiciaciones y Dimensionamiento.* Algoritmos de medición por la estimación de extensión vertical por la técnica de TOFD deberán estar basados en el recorrido del sonido y se deben conocer los parámetros fundamentales (PCS, espesor del material, retardo de la zapata, velocidad acústica de examinación y material acoplante). El operador deberá utilizar información de fase de los A-scan extraídos del B-scan para evaluar la altura vertical y profundidad del defecto. La posición a lo largo o a través del eje de la soldadura o de referencia se determinará mediante el sistema de posicionamiento codificado. Cuando se utilizan varios transductores al mismo tiempo (instrumentos de varios canales) para el examen de secciones gruesas o para mejorar la resolución de tamaño, cualquier lateral off-sets entre los transductores deberá ser modificado para la reconstrucción de la imagen. Con ello se pretende garantizar que las indicaciones de la misma diana pueden ser alineados a la misma referencia. La evaluación de la parte plana del tiempo de llegada de una indicación en la imagen B-Scan generalmente mejora la determinación de la longitud del defecto. Algoritmos de ajuste de curva hiperbólicas o de apertura sintética técnica de enfoque (SAFT) se pueden incorporar en el software de análisis de TOFD para ayudar en la determinación de la longitud defecto. El ajuste de curvas se limita a defectos rectangulares simples pero puede subestimar longitudes donde los bordes se redondean o son de pendiente.
- 10.9.2. *Determinación de la Profundidad del Defecto.* La profundidad desde la superficie de examinación hacia el borde inicial del defecto es determinado mediante el conocimiento del tiempo de llegada de la onda y el seteo de los parámetros.
- 10.9.3. *Determinación de la Altura del Defecto.* Para determinar la altura del defecto o la extensión vertical, de determina el tiempo de arribo de la señal sobre el borde superior e inferior del defecto y la diferencia de estas dos profundidades nos brinda la altura del defecto.



NON DESTRUCTIVE TESTING

AD – NDT – SMPI – TOFD - 01

Date: 28/08/2013

Edition: 1.0

Review N°: 0.0

Page 15 de 24

SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE

11.0. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO

11.1. Tenga en cuenta los parámetros a ingresar en el equipo, tales como:

11.1.1. PCS

11.1.2. Frecuencia de los transductores

11.1.3. Tipo y dimensión de los Transductores

11.1.4. Ángulo de la zapata utilizada

11.1.5. Tipo de material y Velocidad Longitudinal del sonido

11.1.6. Espesor del material a inspeccionar

11.2. Las Tablas 1, 2, 3 y 4 proporcionan parámetros de la unidad de búsqueda generales para rangos de espesor especificados en soldaduras ferríticas. Para materiales de alta atenuación austeníticos o de otro tipo, las frecuencias nominales normalmente necesitan ser reducidas y la dimensión del elemento debe ser incrementada.

11.3. **EXAMINACIÓN.** Para espesores que se aproximan a 3 pulgadas (75 mm), la divergencia del haz de una sola unidad de búsqueda no es probable que proporcione la intensidad suficiente para una buena detección por todo el volumen a examinar. Por lo tanto, para un espesor de 3 pulgadas (75 mm) y mayor, el volumen de examen debe ser dividido en varias zonas. Tabla 2 proporciona una guía general sobre el número de zonas para garantizar la cobertura de volumen adecuado. Ejemplos de la disposición de la unidad de búsqueda y cobertura de volumen haz aproximada se proporcionan en la figura 6 hasta la Figura 9.

SEARCH UNIT PARAMETERS FOR MULTIPLE ZONE EXAMINATIONS UP TO 12 in. (300 mm) THICK

Nominal Wall, in. (mm)	Nominal Frequency, MHz	Element Size, in. (mm)	Angle, deg
< 1.5 (< 38)	5 to 15	0.125 to 0.25 (3 to 6)	50 to 70
1.5 to 12 (38 to 300)	1 to 5	0.25 to 0.5 (6 to 12.5)	45 to 65

Tabla 1. Parámetros Recomendados de las Unidades de Búsqueda.

RECOMMENDED TOFD ZONES FOR BUTT WELDS UP TO 12 in. (300 mm) THICK

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

NOTE:

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

Tabla 2. Recomendaciones de la División de las Zonas de Inspección

SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE

Nominal Wall Thickness mm [in.]	Nominal Frequency (MHz)	Element Size mm [in.]	Recommended Angles
<12 [0.5]	10 to 15	2 to 6 [0.08 to 0.25]	60 to 70°
12 to <35 [0.5 to 1.4]	5 to 10	2 to 6 [0.25 to 0.5]	50 to 70°
35 to <75 [1.4 to 3]	2 to 5	6 to 12 [0.25 to 0.5]	45 to 65°

Tabla 3. Rango de Espesores para Acero hasta 75mm (3in)

Wall Thickness Zone mm [in.]	Nominal Frequency (MHz)	Element Size mm [in.]	Nominal Angle
<35 [0 to 1.4]	5 to 10	2 to 6 [0.08 to 0.25]	50 to 70°
35 to <100 [1.4 to 4]	2 to 7.5	6 to 12 [0.25 to 0.5]	45 to 65°
100 to <300 [4 to 12]	2 to 7.5	6 to 12 [0.25 to 0.5]	45 to 65°

Tabla 4. Rango de Espesores para Acero desde 75mm (3in) hasta 300mm (12in)

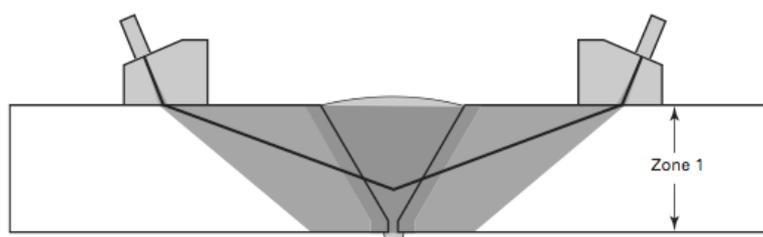


Figura 6. Ejemplo de una configuración con una simple zona de inspección.

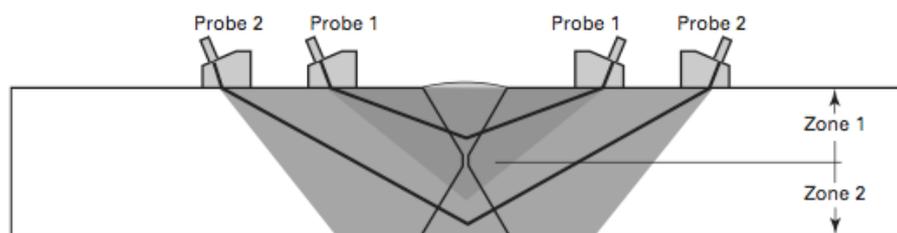


Figura 7. Ejemplo de una configuración con dos zona de inspección (igual altura de las zonas).

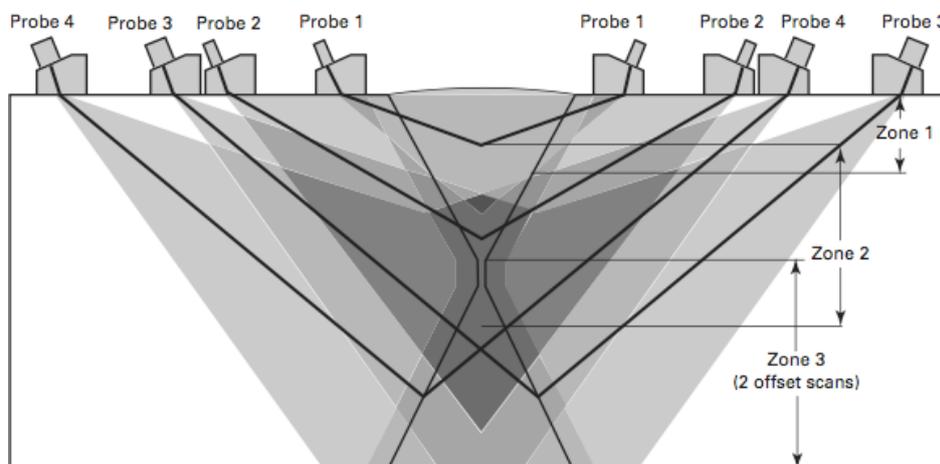


Figura 8. Ejemplo de una configuración con tres zonas de inspección.

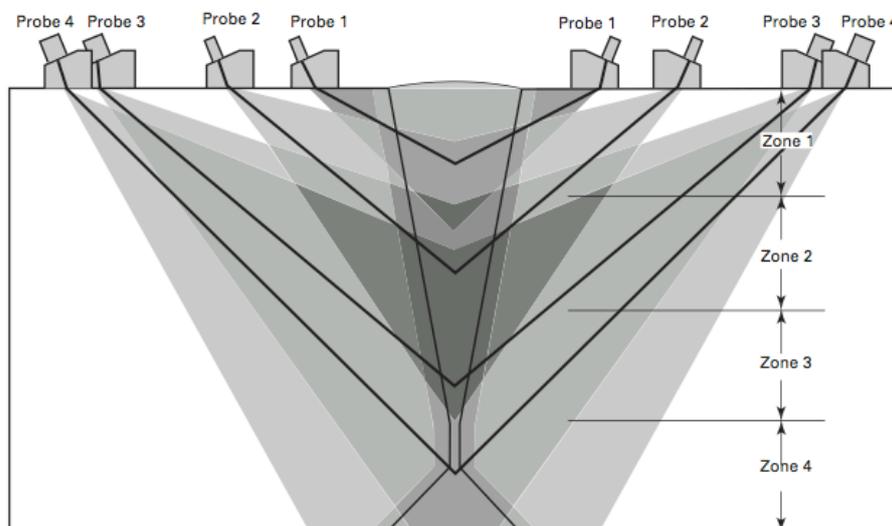


Figura 9. Ejemplo de una configuración con cuatro zonas de inspección (igual altura de las zonas).

11.4. ANÁLISIS TOFD

11.4.1. Calidad de la Data.

- a. Las imágenes TOFD deberán ser evaluadas por la calidad de la data registrada antes del análisis de la data. La evaluación o valoración de las imágenes deberá seralazar en función de:
 - La amplitud de la onda lateral debe de iniciar entre 40% a 90% FSH, o en función de la verificación de la sensibilidad con respecto a la sensibilidad de referencia deberá ser verificada en intervalos no mayores a 4 horas de trabajo.
 - Líneas de datos perdidos que no cumplan con los parámetros indicados en 10.0.
 - Traslapes adecuados (por ejemplo, la longitud de la soldadura escaneada como en una soldadura circunferencial donde la posición de fin debe ser realizada pasando la posición de inicio de la adquisición de la data). El mínimo traslape requerido es de 25mm (1in).
 - El adecuado flujo de acoplante mediante la verificación de la pérdida o disminución de la amplitud de la señal (señal de la onda lateral, onda de fondo o ruido de los granos pueden ser observados para verificar que la amplitud no sea más grande de 6dB).
- b. Escaneos con calidad inaceptables deberán ser nuevamente realizados corrigiendo las deficiencias iniciales

11.4.2. Indicaciones Relevantes.

- a. Las indicaciones relevantes pueden ser clasificadas como superficiales o embebidas.
- b. Así mismo las discontinuidades embebidas pueden ser también clasificadas en:
 - Puntuales (aquellas que no es posible medir su longitud).
 - Elongada tipo hilo (aquellas que no es posible medir su altura)
 - Elongada con Altura (aquellas que es posible medir su altura)
- c. Los defectos superficiales pueden ser identificados por la superficie sobre la cual estos ocurren; escaneos sobre la superficie de contacto, o en la superficie lejana (opuesta) o a través de la pared. Defectos superficiales que son pasantes tienen ambas superficies afectadas y ellos nos brinda una evidencia de una reducción o eliminación de las señales de la onda lateral o de fondo, acompañada por señales difractadas sobre ambos extremos.



NON DESTRUCTIVE TESTING

AD – NDT – SMPI – TOFD - 01

Date: 28/08/2013

Edition: 1.0

Review N°: 0.0

Page 18 de 24

SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE

11.4.3. *Tolerancias.* El grado de exactitud sobre el cual la posición de una indicación en una escaneo TOFD es definida por la precisión del sistema. Esto generalmente depende del equipo utilizado la geometría de la parte a ser inspeccionada y la exactitud de los tiempos de recepción de las señales. Cuando una tolerancia de precisión es requerida, ambas partes contractuales deberán ponerse de acuerdo en el método usado para definir esta tolerancia.

12.0. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

- 12.1. Consideraciones especiales de un técnico experimentado deben ser tenidas en cuenta durante la interpretación de los resultados, para una adecuada localización e identificación de las discontinuidades originadas durante el proceso de fabricación.
- 12.2. Mediante la comparación de los resultados del Scan A y Scan D, con los estándar de aceptación, la soldadura será juzgada como aceptable o rechazada, basados en la severidad de la discontinuidad.
- 12.3. Cualquier partícula embebida que salga a la superficie interna o externa o que atraviese la pared completa es interpretada como una falta de fusión o penetración incompleta.
- 12.4. Imperfecciones que no son interpretadas como falta de fusión (LOF) o penetración incompleta (IP) pueden ser o no consideradas para rechazar la soldadura. Cualquier dimensión de un reflector identificado como indicación o defecto similares a grietas no deben ser mayores que el tamaño permisible así:
- 12.4.1. Para espesores menores de 25.4mm, el tamaño crítico es de 1/3 del espesor de la pared.
- 12.4.2. Para espesores mayores de 25.4mm, el tamaño crítico es de 9.5mm.
- 12.5. La presencia de múltiples indicaciones (puntos de reflexión, fusión incompleta, grietas) dan como resultado el rechazo de la soldadura. Los defectos de la soldadura deben ser categorizados basados en los criterios de rango de severidad mostrados en la Tabla 5.

Inspección por UT-TOFD – Rango de Severidad		
Tipo de Defecto	Categoría 1	Categoría 2
1 – 6 puntos reflectores		X
7 puntos reflectores	X	
Múltiples puntos reflectores	X	
Grieta menor a la longitud del defecto crítico	X	
Grieta mayor a la longitud del defecto crítico	X	
Fusión Incompleta	X	
Fusión Incompleta más punto reflector	X	
Pérdida de onda longitudinal y/o onda de fondo	X	
Daños Mecánicos y Cortaduras.		X

Notas:

Categoría 1. Contiene varios defectos y deben ser removidos

Categoría 2. Contiene defectos mayores y deben ser removidos a consideración del inspector

Tabla 5. Criterios de Rangos de Severidad de la Soldadura.

- 12.6. Los defectos detectados en uniones termofusionadas se evaluarán de acuerdo a los criterios de aceptación dados en el Código ASME B31.3, Edición 2012, Tabla A341.3.2. (Tabla 6), y teniendo en cuenta que las áreas con penetración incompleta (IP) y falta de fusión (LOF) serán inaceptables sin importar su longitud.

SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE

Tipo de imperfección	Termoplásticos			RTR y RPM [Nota (1)]
	Soldado con gas caliente	Solvente cementado	Fusión térmica	Adhesivo cementado
Grietas	No permitido	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Áreas sin material de aporte en juntas	No permitido	No permitido	No permitido	No permitido
Áreas sin adhesivo en juntas	No aplicable	No permitido	No permitido	No permitido
Inclusiones de material carbonizado	No permitido	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Inclusión de material de relleno no fundido	No permitido	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Proyección de material dentro de la tubería, % del espesor de pared del tubo	No aplicable	Cemento, 50%	Material fundido, 25%	Adhesivo, 25%

NOTA:

(1) RTR = Resina reforzada termoestable; RPM = argamasa plástica reforzada

Tabla 6. Criterios de Aceptación para Juntas a Tope de HDPE

13.0. DOCUMENTACIÓN

13.1. REGISTRO DE INDICACIONES

13.1.1. *Indicaciones No Rechazables.* Indicaciones no rechazables se registrarán como se especifica en la Sección de referencia del código.

13.1.2. *Indicaciones Rechazables.* Indicaciones rechazables deberá ser registradas. Como mínimo, el tipo de indicación (es decir, fisura, falta de fusión, escoria, etc), la ubicación y la extensión (es decir, la longitud) se registrarán.

13.2. **REGISTRO DE EXAMINACIÓN.** Para cada examinación la siguiente información deberá ser registrada:

13.2.1. Identificación del Procedimiento y revisión.

13.2.2. Identificación del instrumentos ultrasónico (fabricante, modelo, número de serie).

13.2.3. Identificación de las unidades de búsqueda (fabricante, número de serie, frecuencia, dimensión).

13.2.4. Ángulos usados.

13.2.5. Acoplante usado (fabricante o tipo)

13.2.6. Cables de las Unidades de Búsqueda usados, tipo y longitud.

13.2.7. Equipamiento especial cuando sea usado (unidades de búsqueda, zapatas, equipamiento de escaneo automático, equipamiento registrador, etc.)

13.2.8. Identificación y revisión del programada de computadora usado.

13.2.9. Identificación del bloque de calibración.

13.2.10. Bloque simulado y simulador electrónico, identificación, cuando sea usado.

13.2.11. Nivel de la ganancia de referencia del instrumento, si es usado el amortiguamiento y nivel de rechazo.

13.2.12. Información de la calibración, nivel de sensibilidad y configuración del rango (incluyendo reflectores de referencia, amplitud de las indicaciones, y lectura de las distancias).

13.2.13. Datos que correlacionan el bloque(s) de simulación y el simulador electrónico, en su uso, con la calibración inicial;

13.2.14. Identificación y localización de la soldadura o volumen escaneado, descripción de la parte a evaluar (incluyendo espesor, geometría y material)

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 20 de 24</i>

- 13.2.15. Superficie(s) desde la cual fue realizada la inspección, incluyendo la condición de la superficie y temperatura.
 - 13.2.16. Estatus de la examinación (aceptada o rechazada en función de los criterios de aceptación estipulados)
 - 13.2.17. Mapa o registro de las indicaciones rechazadas detectadas o áreas limpias. Incluyendo localización, medida y clasificación de cualquier indicación relevante.
 - 13.2.18. La altura del defecto se indicará, si es especificada a solicitada por el cliente.
 - 13.2.19. Áreas de acceso restringido o soldadura inaccesibles para el escaneo
 - 13.2.20. Identificación del personal inspector, y cuando sea requerido por el cliente o código, estándar o especificación aplicable, el nivel de calificación
 - 13.2.21. Fecha de examinación
 - 13.2.22. Espaciamiento del Centro de los Transductores (PCS)
 - 13.2.23. Espaciamiento del muestreo de datos
 - 13.2.24. Los niveles finales del procesamiento de las imágenes.
 - 13.2.25. Nombre del file y descripción del contenido de la data almacenada.
- 13.3. **PROTOCOLO DE INSPECCIÓN.** Un protocolo de la examinación deberá ser elaborado. El reporte deberá incluir lo indicado en 13.1 y 13.2. El protocolo deberá ser presentado y mantenido de acuerdo con la Sección de referencia del código.

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01
		<i>Date:</i> 28/08/2013
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION	<i>Edition:</i> 1.0
	TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Review N°:</i> 0.0
		<i>Page 21 de 24</i>

ANEXO I: INSTRUCTIVO DE INSPECCIÓN

1. ANTES DE INICIAR EL PROCESO DE INSPECCIÓN

- 1.1. Realice una inspección visual de la junta y el material base adyacente; tenga en cuenta que imperfecciones como indentaciones, desalineamiento excesivo, excesivo solape, labios demasiado gruesos (para el caso de uniones termofusionadas) y faltas de fusión no deben exceder los valores permisibles establecidos por el cliente y serán registradas y reportadas.
- 1.2. Las posibles imperfecciones que puedan presentarse en el material base tales como: espesor del material fuera de tolerancia, desalineamiento de la tubería, porosidad, defectos similares a grietas, laminaciones o inclusiones deben identificarse y ser documentados.
- 1.3. La superficie a inspeccionar debe estar libre grasa, polvo o recubrimientos que afecten el desempeño durante la inspección.
- 1.4. Todos la longitud de la soldadura o los 360° de la junta de tuberías deben ser inspeccionados primero visual y luego ultrasónicamente.
- 1.5. Se debe proporcionar las condiciones adecuadas para que las uniones soldadas de planchas o tubería pueda ser inspeccionada, cuidando siempre de mantener los requisitos de seguridad necesarios para el personal.

2. DURANTE EL PROCESO DE INSPECCIÓN

- 2.1. Seleccione las zapatas de acuerdo a la configuración y geometría de la unión soldada inspeccionar, estas deben permanecer siempre en contacto con el material base y a 90°.
- 2.2. Inicie el equipo en TOFD e ingrese los parámetros adecuados para la inspección.
- 2.3. Dimensione el área de trabajo, marcando secciones comprendidas en tramos dependiendo del perímetro de la tubería e iniciando a las 12:00 horas, el sentido de giro de las manecillas del reloj.
- 2.4. Aplique acoplante sobre la superficie del material base y verifique cuales son las ondas lateral y de fondo respectivas, teniendo en cuenta de mantener el PCS de inspección. Ubique los cursores verticales como referencia en cada onda. (positiva en la onda lateral y en negativa en onda de fondo), para mantener la referencia.
- 2.5. Ahora ubique el dispositivo de barrido en la zona adyacente a la soldadura y modifique sus parámetros, si es necesario de: ganancia, rango e inicio del espectro para lograr una buena recolección de datos. Si realiza barrido con sistema ROTIX, NAVIC o similar para mantener una distancia contsnate del palpador a la unión soldada o termofusionada de esta manera se puede inspeccionar el total del espesor del material de unión.
- 2.6. La velocidad de barrido no debe exceder de 50mm/s.
- 2.7. La sensibilidad durante el barrido debe ser la misma que la definida en el bloque de calibración, con una relación de señal-ruido de 6 decibeles.
- 2.8. Durante la inspección use siempre por lo menos las ventanas de Scan A y Scan D. Si no logra obtener un buen espectro, repita el barrido hasta que estén totalmente definidas las ondas lateral y de fondo en toda su longitud.
- 2.9. Revise el video y analice el contenido del espectro, si hay una indicación presente repita el barrido para asegurarse de lo que es.
- 2.10. Guarde la imagen y continúe con los siguientes barridos. Al menos un registro de imagen con el Scan D y un Scan A deben quedar guardados por cada junta inspeccionada, estas imágenes deben ser guardadas en un medio electrónico CD-ROM-USB y entregado con el informe escrito. Los datos de equipo, accesorios y configuración deben quedar registrados en el informe final.
- 2.11. Las juntas inspeccionadas deben ser marcadas como inspeccionadas con UT-TOFD e indicando la fecha de inspección, y si la junta ha sido aceptada será marcada un color verde con las iniciales AC y si ha sido rechazada será marcada de color rojo y con las iniciales RJ

	NON DESTRUCTIVE TESTING	AD – NDT – SMPI – TOFD - 01	
		<i>Date:</i>	<i>28/08/2013</i>
	SPECIFIC AND PROVEN METHOD OF INSPECTION TIME OF FLIGHT DIFFRACTION EXAMINATION PROCEDURE	<i>Edition:</i>	<i>1.0</i>
		<i>Review N°:</i>	<i>0.0</i>
		<i>Page 23 de 24</i>	



**NON DESTRUCTIVE TESTING - AUTOMATED ULTRASONIC TESTING
(ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS - ULTRASONIDO AUTOMATIZADO)**

**INSPECTION RECORD OF GROOVE WELDS
(REGISTRO DE INSPECCIÓN DE UNIONES SOLDADAS)**

PAU-300-M-PR-006-0 Prot01
PAGE/PAGINA: 01 of 02
DATE/FECHA: 24/07/2012
REV./REV. Rev. 00

REGISTER Nº: _____

PROJECT IDENTIFICATION/IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO:

CUSTOMER/CLIENTE:	PLACE/INSTALACIÓN:
PROJECT/PROYECTO:	DATE/FECHA:
STANDARD/ESTÁNDAR:	PROCEDURE/PROCEDIMIENTO:

DESCRIPTION OF THE ELEMENT TO INSPECT/DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO A INSPECCIONAR:

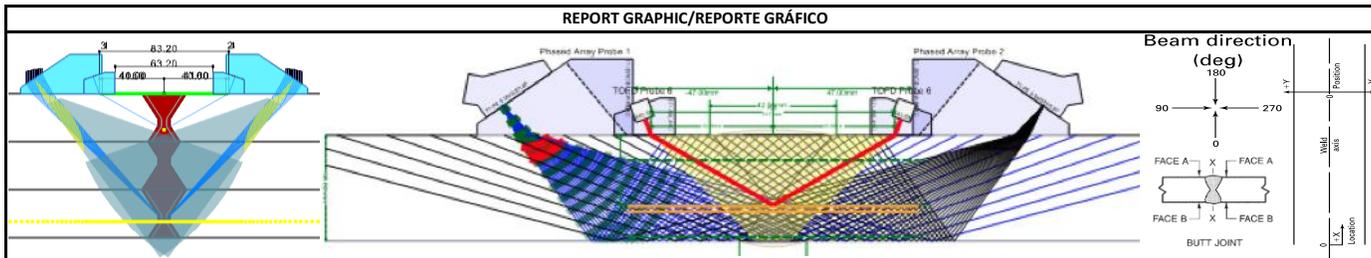
ELEMENT TO EVALUATE:	WELD IDENTIFICATION:
DIMENSIONS/TICHNESS:	MATERIAL BASE/ EQUIPMENT :
JOINT TYPE TO EXAMINATION: <input type="checkbox"/> BUTT <input type="checkbox"/> IN L (CORNER) <input type="checkbox"/> IN T <input type="checkbox"/> A OVERLAP <input type="checkbox"/> ON EDGE	
COMBINATIONS OF GEOMETRY AND BEZEL DESIGN BY THE BOARD TO INSPECT: <input type="checkbox"/> STRAIGHT <input type="checkbox"/> SCARF <input type="checkbox"/> 1/2 V <input type="checkbox"/> IN V <input type="checkbox"/> IN DOUBLE V	
<input type="checkbox"/> IN J <input type="checkbox"/> IN U <input type="checkbox"/> IN K <input type="checkbox"/> IN L CURVE <input type="checkbox"/> WITH BACKING	
WELDING PROCESS/BPS/WELDER:	SURFACE CONDITION:

EQUIPMENT AND MATERIALS USED/EQUIPOS Y MATERIALES USADOS

FLAW DETECTOR EQUIPMENT:	BRAND:	MODEL:	SERIAL NUMBER:
SEARCH UNIT(S) IDENTIFICATION:	TRANSUCER: BRAND/TYPE:	SIZE/FREQ.:	SERIAL NUMBER:
	WEDGE EXTERNAL: BRAND/TYPE:	MODEL:	SERIAL NUMBER:
	BRAND/TYPE:	MODEL:	SERIAL NUMBER:
CALIBRATION BLOCK:	BRAND:	TYPE:	SERIE:
REPRESENTATION OF SCANNING:	<input type="checkbox"/> A - SCAN <input type="checkbox"/> B - SCAN <input type="checkbox"/> C - SCAN	BEAM TYPE: <input type="checkbox"/> NORMAL <input type="checkbox"/> ANGLE	
	<input type="checkbox"/> S - SCAN <input type="checkbox"/> D - SCAN <input type="checkbox"/> RADIO FREQUENCY	TECHNIQUE: <input type="checkbox"/> UTPA <input type="checkbox"/> TOFD	
INSPECTION TECHNIQUE USED:	<input type="checkbox"/> PULSE - ECHO <input type="checkbox"/> ECHO - ECHO <input type="checkbox"/> EMISSOR - RECEP.	<input type="checkbox"/> INMERSIÓN <input type="checkbox"/> OTHER	
SEARCH UNIT CABLE(S) USED:	TYPE:	LENGTH:	SPECIAL EQUIPM.:
COMPUTERIZED PROGRAM USED:	BRAND:	NAME:	VERSION:
SIMULATION BLOCK(S):	ELECTRONIC SIMULATOR:	DAMPING:	REJECT:
EQUIPMENT SETUP CALIBRATION DATA:	VELOCITY:	REF GAIN.:	NOTCH OF REF.:
COUPLING GEL USED:	BRAND:	COMPOSITION:	DENSITY:

EVALUATION RESULTS/RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN

ITEM	WELD CODE OR DESIGNAT.	INDICAT. Nº	FROM FACE	MAXIMUM DAC, %	SOUND PATH (mm)	DIMENSIONS DISCONTINUITIES (mm)				BEAM ANGLE UTPA/TOFD Deg	ANGLE DIRECTION Deg	APROV. FINAL	AREAS OF RESTRICTED ACCESS OR INACCESSIBLE/ COMMENTS AND STATUS
						LOC. (X)	LENGTH	POS. (Y)	DEPTH				



The undersigned, hereby certify that this record is correct and that the element or welded joints were prepared and inspected in accordance with the requirements of ASME Code Section V Art. 4, and ASME B31.3 .Process Piping

FINAL APPROVAL/APROVACIÓN FINAL

INSPECTED BY/INSPECCIONADO POR - ADEMINSAC:			REVIEWED BY/REVISADO POR - SERPETBOL PERÚ S.A.C.:			APPROVED BY/APROBADO POR - AUSENCO:		
NAME/ NOMBRE:	D:		NAME/ NOMBRE:	D:		NAME/ NOMBRE:	D:	
SIGN/ FIRMA:	M:		SIGN/ FIRMA:	M:		SIGN/ FIRMA:	M:	
	Y:			Y:			Y:	



**NON DESTRUCTIVE TESTING - AUTOMATED ULTRASONIC TESTING
(ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS - ULTRASONIDO AUTOMATIZADO)**

PAU-300-M-PR-006-0 Prot01

PAGE/PAGINA: 02 of 02

DATE/FECHA: 24/07/2012

REV./REV. Rev. 00

**INSPECTION RECORD OF GROOVE WELDS
(REGISTRO DE INSPECCIÓN DE UNIONES SOLDADAS)**

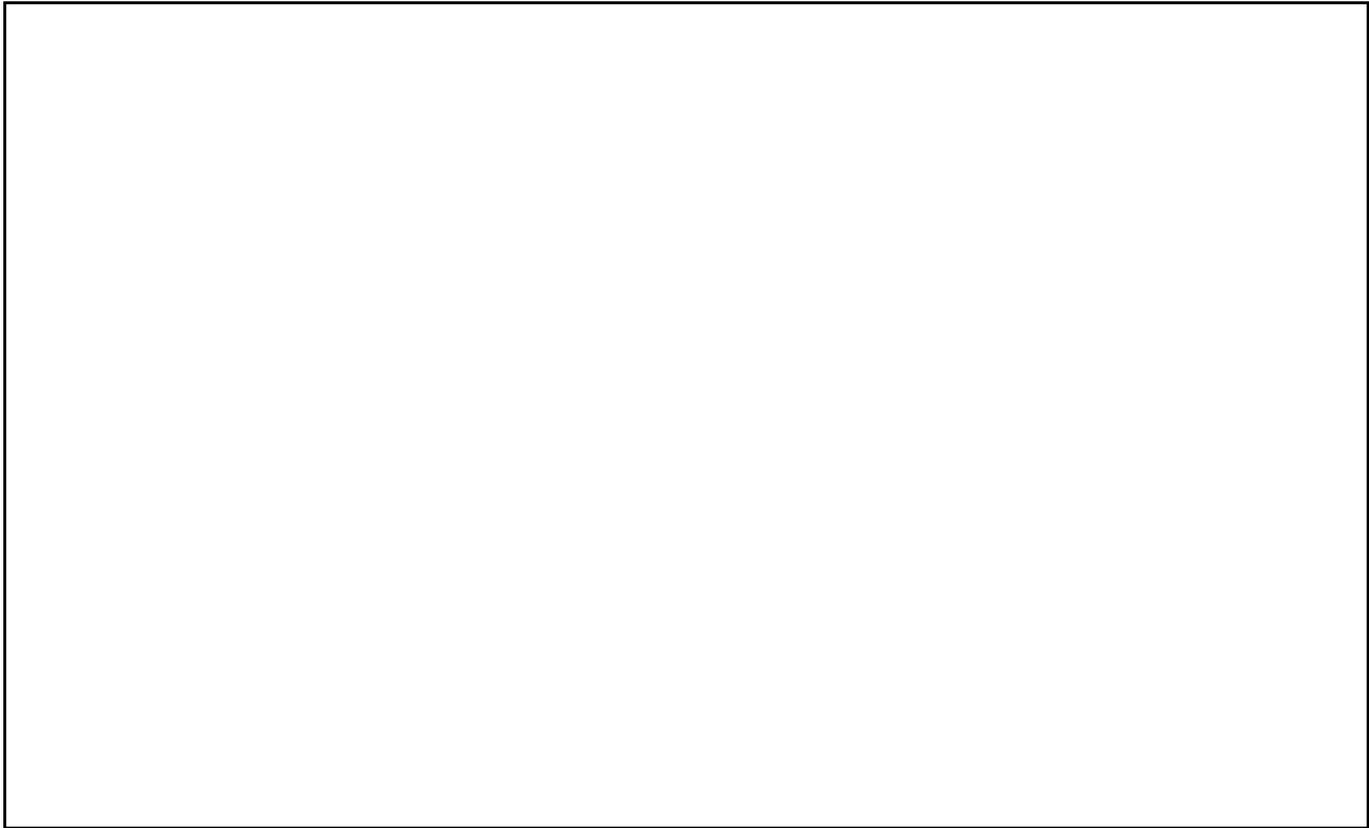
REGISTER Nº: _____

PROJECT IDENTIFICATION/IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO:

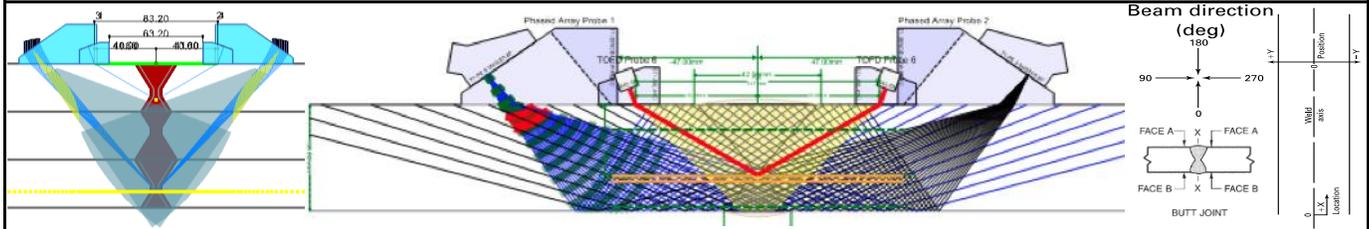
CUSTOMER/CLIENTE:	PLACE/INSTALACIÓN:
PROJECT/PROYECTO:	DATE/FECHA:
STANDARD/ESTÁNDAR:	PROCEDURE/PROCEDIMIENTO:

DESCRIPTION OF THE ELEMENT TO INSPECT/DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO A INSPECCIONAR:

ELEMENT TO EVALUATE:	WELD IDENTIFICATION:
DIMENSIONS/TICHNESS:	MATERIAL BASE/ EQUIPMENT :
JOINT TYPE TO EXAMINATION: <input type="checkbox"/> BUTT <input type="checkbox"/> IN L (CORNER) <input type="checkbox"/> IN T <input type="checkbox"/> A OVERLAP <input type="checkbox"/> ON EDGE	
COMBINATIONS OF GEOMETRY AND BEZEL DESIGN BY THE BOARD TO INSPECT: <input type="checkbox"/> STRAIGHT <input type="checkbox"/> SCARF <input type="checkbox"/> 1/2 V <input type="checkbox"/> IN V <input type="checkbox"/> IN DOUBLE V	
<input type="checkbox"/> IN J <input type="checkbox"/> IN U <input type="checkbox"/> IN K <input type="checkbox"/> IN L CURVE <input type="checkbox"/> WITH BACKING	
WELDING PROCESS/BPS/WELDER:	SURFACE CONDITION:



REPORT GRAPHIC/REPORTE GRÁFICO



The undersigned, hereby certify that this record is correct and that the element or welded joints were prepared and inspected in accordance with the requirements of ASME Code Section V Art. 4, and ASME B31.3 .Process Piping

FINAL APPROVAL/APROVACIÓN FINAL

INSPECTED BY/INSPECCIONADO POR - ADEMINSAC:		REVIEWED BY/REVISADO POR - SERPETBOL PERÚ S.A.C.:		APPROVED BY/APROBADO POR - AUSENCO:	
NAME/ NOMBRE:	D:	NAME/ NOMBRE:	D:	NAME/ NOMBRE:	D:
SIGN/ FIRMA:	M:	SIGN/ FIRMA:	M:	SIGN/ FIRMA:	M:
	Y:		Y:		Y:

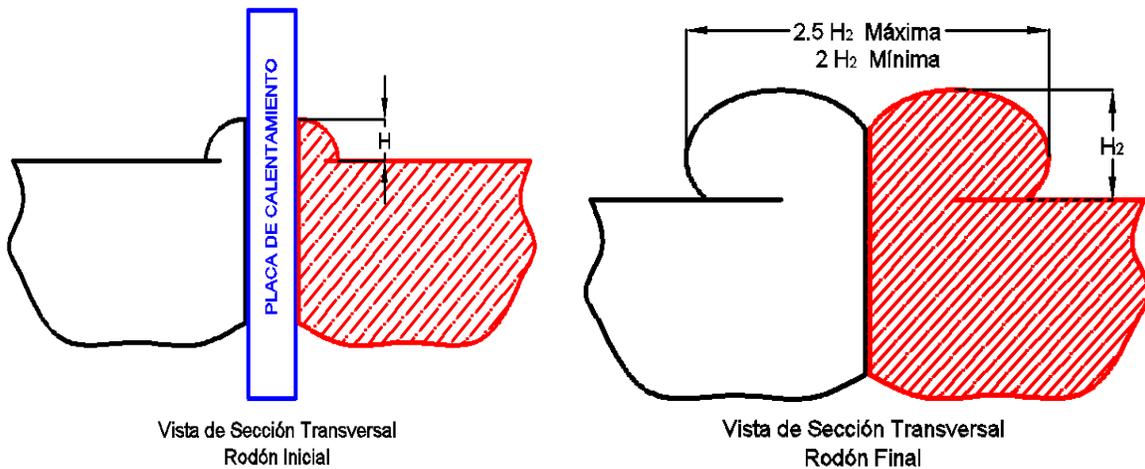


**REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO
DE TERMOFUSION**

Pagina: 1 de 1
Fecha: 15/02/2014
PQR: ASC-05
Rev.: 0

Empresa:	Cliente:
Lugar:	
País:	Alineación:
Proceso:	Tipo:
Hora de Inicio de Prueba:	Hora de Finalizacion de Prueba:
Tiempo de Fusión:	Limpieza:
Diámetro / Espesor de Probeta:	
Diseño de Junta:	
Presión de Formación inicial (P1)	
Altura de Rodon inicial aprox. (H)	
Temperatura de la placa (T)	
Numero de Fusionistas:	
Presión de Formación final (P2)	
Tiempo de calentamiento (t1)	
Tiempo de apertura y cierre(t2+t3)	
Fusionista:	
Supervisor de Soldadura por Termofusión:	

Diseño de junta y secuencia de cordones:



ENSAYO DE DOBLEZ

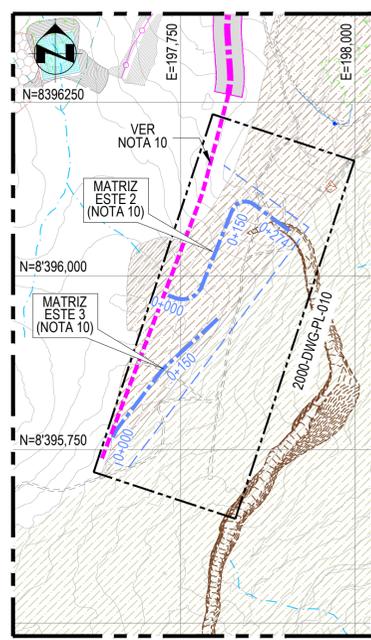
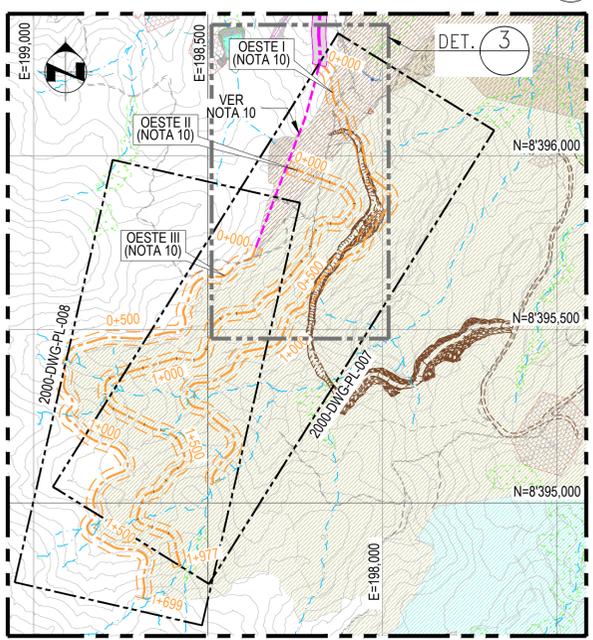
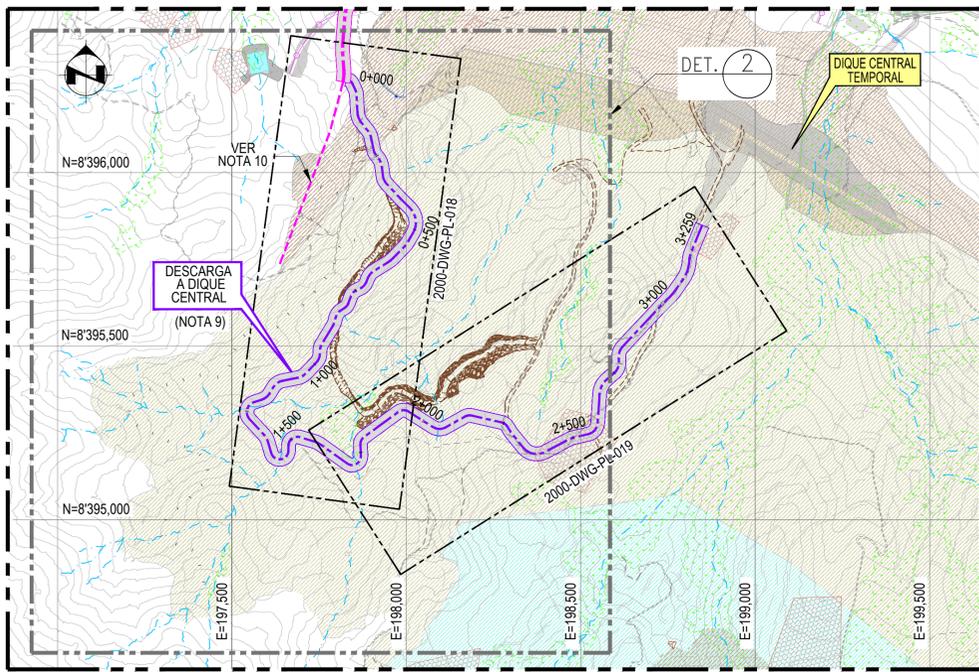
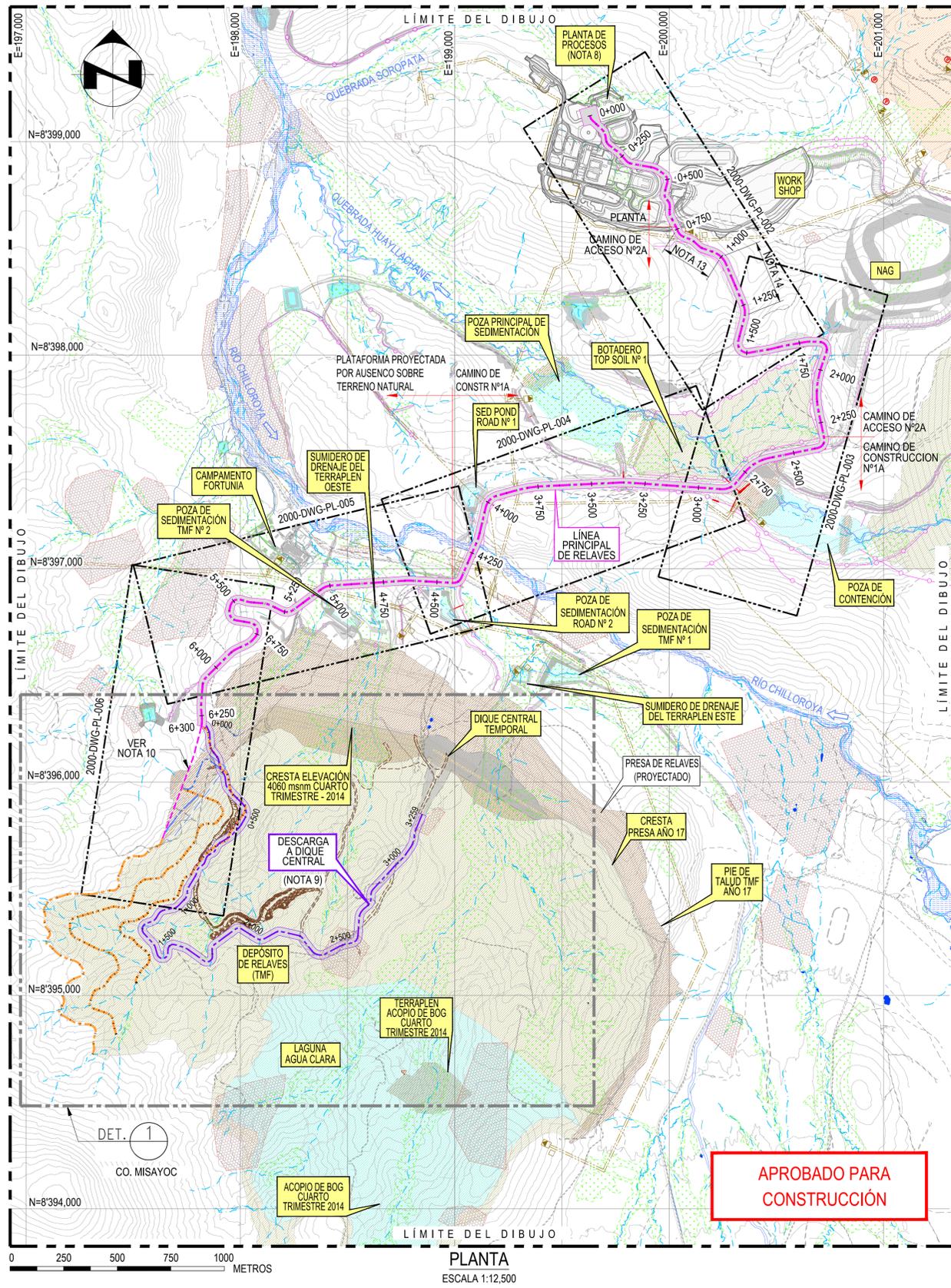
<i>Especimen</i>	<i>Resultados</i>	<i>Especimen</i>	<i>Resultados</i>

Emitido por: Insp. de Soldadura N II SPB	Revisado por: Coordinador de Calidad SPB	Aprobado por: Supervisor Cliente
Nombre:	Nombre:	Nombre:
Fecha:	Fecha:	Fecha:

	REGISTRO DE CALIFICACION DE SOLDADOR (De acuerdo al código ASME - Sección IX)		BPQR No. 005	
			HOJA:	1 de 1
			EMISION:	05/04/2011

REGISTRO DE CALIFICACION DE SOLDADOR (BPQ)					
Cliente: AUSENCO			Proyecto: SOW-0509-Tailings and Water Recovery System Piping & Pipelines inst.		
Nombre del Soldador:		Nº. Estampa:	DNI.		
Identificación de BPS seguido por el soldador:			Evaluado en: <input checked="" type="checkbox"/> Probeta <input type="checkbox"/> Soldadura Producción		
Tipo:			Espesor:		
Variables de soldadura		Valor Usado en la Calificación		Rango Calificado	
Proceso :					
Tipo usado:					
Tiempo de Calentamiento (t1):					
Tubería (ingrese diámetro, si es tubería)					
Presión de formación inicial (P1):					
Altura de Rodon inicial aprox.(H) :					
Altura de Rodon final (H2):					
Ancho de Rodon final:					
Temperatura de placa (T):					
Presión de formación final (P2):					
Tiempo de apertura y cierre (t2+t3) :					
Presión interfacial de fusión (P3)					
Tiempo de mantención mínimo (t4):					
Temperatura mínima de retiro					
Humedad Relativa					
Temperatura Ambiente					
RESULTADOS					
Resultado de Inspección Visual:					
Resultados de Prueba de Doble:					
(x) Lado		() Cara y Raíz Transversal		() Cara y Raíz Longitudinal	
() Tubería, Resistencia a la corrosión			() Plancha, resistencia a la corrosión		
Tipo	Resultado	Tipo	Resultado	Tipo	Resultado
<i>Lado</i>	---	---	---	---	---
<i>Lado</i>	---	---	---	---	---
Soldadura de filete: ---			Longitud y porcentaje de defectos: ---		
Macro ataque: ---		Tamaño : ---		Concavidad/Convexidad: ---	
Ultrasonido evaluado por:			Compañía:		
Inspección visual evaluada por:			Compañía:		
Soldadura supervisada por:					
Nosotros certificamos que los datos registrados son correctos y que las probetas fueron preparadas, soldadas y probadas de acuerdo a los requerimientos del Código ASME Sección IX – 2013.					

Inspector de Control de Calidad	Coordinador de Control de Calidad	Supervisor Cliente



LEYENDA DE PROYECTO		
CORREDOR LÍNEA PRINCIPAL DE RELAVES		CORREDOR LÍNEA PRINCIPAL DE RELAVES (NOTA 10)
CORREDOR LÍNEA DE DESCARGA A LÍNEA CENTRAL		CORREDOR LÍNEA DE CONDUCCIÓN DE RELAVES - LADO OESTE (NOTA 10)
CORREDOR LÍNEA PRINCIPAL DE RELAVES (NOTA 10)		CORREDOR LÍNEA DE CONDUCCIÓN DE RELAVES - LADO ESTE (NOTA 10)
CORREDOR LÍNEA DE CONDUCCIÓN DE RELAVES - LADO OESTE (NOTA 10)		

LEYENDA DE TOPOGRAFÍA (NOTA 3)		
CARRETERA AFIRMADA		ACEQUIA
SENDERO		TERRENO CULTIVO
CURVAS DE NIVEL		PANTANO
SURCOS FUNDACIÓN		LAGUNA
RÍO		CERCO
QUEBRADA		ZONA ARQUEOLÓGICA
		ALCANTARILLA
		ACCESO POR OTROS
		LÍNEA ELÉCTRICA Y FIBRA ÓPTICA (NOTA 11)
		CANAL
		CAMINO PROJ. EN PRESA DE RELAVES (NOTA 7)

- NOTAS:
- TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN METROS, SALVO INDICACIÓN CONTRARIA. ELEVACIONES EN M.S.N.M.
 - SISTEMA DE PROYECCIÓN PARA GENERAR LA GRILLA DE COORDENADAS: SISTEMA : UTM DATUM : WGS 84 ZONA : 19 SUR
 - LA TOPOGRAFÍA HA SIDO PROPORCIONADA POR EL CLIENTE.
 - LAS PROGRESIVAS MOSTRADAS CORRESPONDEN AL EJE DEL CORREDOR, DENTRO DEL CUAL SE INSTALARÁ LA LÍNEA DE RELAVES.
 - EL ANCHO DEL CORREDOR DE LA LÍNEA PRINCIPAL ES DE 40 METROS.
 - LOS CRUCES ESPECIALES DE CURSOS DE AGUA SE DISEÑAN SEGÚN LO INDICADO EN LOS PLANOS CRUCE ESPECIAL SOBRE ALCANTARILLA PSP5605-2000-DWG-PL-013 Y CRUCE ESPECIAL RÍO CHILLOROYA PSP5605-2000-DWG-PL-012.
 - DURANTE LA CONSTRUCCIÓN SE DEBERÁ VERIFICAR INTERFERENCIAS EN EL SECTOR DE LA PLANTA DE PROCESOS.
 - LA INFORMACIÓN DE LA PLANTA DE PROCESOS CORRESPONDE AL ARCHIVO 2172-3000-B-100.DWG.
 - LA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LA PLATAFORMA Y TUBERÍA EN ESTE TRAMO SERÁ SOBRE LA PRESA, POR LO TANTO SE EFECTUARÁ CONFORME AL PLAN DE CRECIMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MISMA.
 - LÍNEA DE CONDUCCIÓN PROYECTADAS A FUTURO, DEBERÁN SER EVALUADAS EN ESTUDIOS POSTERIORES.
 - LÍNEA ELÉCTRICA Y FIBRA ÓPTICA ES REFERENCIAL Y HA SIDO PROYECTADA EN INGENIERÍA CONCEPTUAL SEGÚN INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE.
 - EL DISEÑO DE LAS INSTALACIONES PROYECTADAS HAN SIDO PROPORCIONADAS POR EL CLIENTE Y SU ACTUALIZACIÓN EN LOS PLANOS DE ALINEAMIENTO CONSIDERA TODA LA INFORMACIÓN RECIBIDA HASTA EL 18/10/13, COMO SE DETALLA A CONTINUACIÓN:

TRANSMITTAL	FECHA	DESCRIPCIÓN
KP-2013-CO68-1180-T	15/10/13	MAIN SEDIMENT POND, CONTAINMENT POND, BOTADERO TOP SOIL N°1
KP-2013-CO41-1122-T	29/08/13	TMF 3D
KP-2013-CO68-1105-T	23/08/13	CAMINO WRF. AR1, CR1A, CR1B, CAMINOS POR OTROS, CC8, CC1, NC1, NC3, CAMPSITE FORTUNIA Y CONSTANCIA
KP-2013-CO68-1121-T	29/08/13	CR2B
KP-2013-CO68-1124-T	29/08/13	LLEGADA DIQUE CENTRAL
KP-2013-CO68-1125-T	30/08/13	AR2A
KP-2013-CO77-1089-T	26/07/13	POZAS Y CANALES
KP-2013-LI68-1048-T	23/07/13	NAG
KP-2013-CO68-1140-T	11/09/13	LÍMITES DEL LINER, GENERAL SITE PLAN 2D, CANALES Y ALCANTARILLAS DIVERSOS
PET-01490-2011	05/09/11	ZONAS ARQUEOLÓGICAS
KP-2012-CO41-0278-T	16/05/12	CRUCE RÍO CHILLOROYA
KP-2013-CO68-0985-T	18/06/13	SECCIÓN TÍPICA DE CRUCE DE FIBRA ÓPTICA

- EL DISEÑO DEL CAMINO DE ACCESO N°2A EN ESTE SECTOR SERÁ DEFINIDO POR TERCEROS EN LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN.
- EL DISEÑO DEL CAMINO DE ACCESO N°3 EN ESTE SECTOR SERÁ DEFINIDO POR TERCEROS EN LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN.

RESUMEN DE LÍNEAS DE CONDUCCIÓN			
LÍNEA DE CONDUCCIÓN	COTA PUNTO DE INICIO	COTA FIN DE LÍNEA	LONGITUD DE LÍNEA
PRINCIPAL	4,068.35	4,160.00	6,300.00
DIQUE CENTRAL	4,100.00	4,065.00	3,259.00



REF	No. DE PLANO	PLANO DE REFERENCIA	No	POR	FECHA	DETALLES DE REVISION	REV	ING	APR	DIBUJADO	O.SALAZAR	08.NOV.13	Ausenco Perú S.A.C.
			6	OSV	08.NOV.13	EMITIDO PARA MODIFICACIÓN GENERAL	RT	RA	MD	DIBUJADO	O.SALAZAR	08.NOV.13	Ausenco Perú S.A.C.
			5	OSV	24.SET.13	EMITIDO PARA MODIFICACIÓN GENERAL	RT	RA	MD	REVISADO	R.TINOCO	08.NOV.13	Calle Esquilache 371
			4	VCC	04.DIC.12	EMITIDO PARA MODIFICAR LO INDICADO	RT	RM	MD				Piso 6, San Isidro
	5605-2000-DWG-ME-055	DESCARGA ÚNICA SOBRE EL TMF	3	MGR	28.MAY.13	EMITIDO PARA MODIFICACIÓN GENERAL	MM	RM	MD	DISEÑADO	J.CALIXTO	08.NOV.13	Lima 27
	5605-2000-DWG-ME-054	DERIVACIÓN HACIA EL TMF	2	VCC	04.DIC.12	EMITIDO PARA MODIFICAR LO INDICADO	RT	MM	CH				Perú
	2000-DWG-PL-018@019	LÍNEA DE RELAVES DESC. DIQUE CENTRAL	1	MGR	24.DIC.12	EMITIDO PARA MODIFICAR LO INDICADO	RT	MM	CH	DIS. APRO	R.ALVARADO	08.NOV.13	T +51 1 207 3800
	2000-DWG-PL-002@010	PLANOS DE ALINEAMIENTO	0	VCC	19.JUL.12	EMITIDO PARA CONSTRUCCIÓN	RT	MM	CH	PROJ APRO	M.DODDS	08.NOV.13	F +51 1 207 3810
													W www.ausenco.com

CLIENTE	HudBay Perú S.A.C.		
TÍTULO	SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES INGENIERÍA DE DETALLE PLANO LLAVE LÍNEAS DE CONDUCCIÓN DE RELAVES CONSTANCIA		
COPYRIGHT	© Ausenco Limited	PROYECTO No	5605
		ESCALA	INDICADA
		FORMATO	A1
		Nº	5605-2000-DWG-PL-001
		REV	6

APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN

CONTROL DE JUNTAS SOLDADAS TUBERÍA DE HDPE

SISTEMA	Total de Juntas por Sistema	Avance de Juntas soldadas	% de Avance de Juntas Soldadas	Juntas inspeccionadas por UT	% de Juntas inspeccionadas por UT	Cantidad de juntas para UT requerido por especificación técnica del cliente	% Ultrasonido requerido por especificación técnica del cliente	Rechazo de ensayos de UT	
								% de Juntas rechazadas por UT	Cantidad de Juntas rechazadas por UT
2411	502	502	100.00	135	26.89	50	10.00	0.20	1
2412	144	144	100.00	75	52.08	14	10.00	0.00	0
2423	179	179	100.00	71	39.66	18	10.00	0.56	1
2663	255	253	99.22	217	85.10	255	100.00	9.80	25
2672	171	171	100.00	67	39.18	17	10.00	1.75	3
2673	114	114	100.00	38	33.33	11	10.00	5.26	6
5542 TI	111	110	99.10	71	63.96	28	25.00	11.71	13
5542 TII	165	165	100.00	37	22.42	17	10.00	0.00	0
5550 TI	136	136	100.00	88	64.71	71	100.00	0.00	0
5550 TII	700	692	98.86	689	98.43	700	100.00	11.29	79
5521	310	316	101.94	314	101.29	268	100.00	0.65	2
5620	64	77	120.31	53	82.81	6	10.00	0.00	0
5543	6	6	100.00	5	83.33	1	10.00	0.00	0

* UT: Ultrasonido (Ensayos No Destructivos - Ultrasonido automatizado)

Nota: El porcentaje de Ensayo de Ultrasonido es mayor al requerido por el cliente debido a las juntas enterradas de cada sistema.