

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS POR EL MÉTODO NO  
DESTRUCTIVO DE ULTRASONIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE  
TIEMPO DE VUELO EN MODO DE TRANSMISIÓN.**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico  
Por el bachiller  
**Massarelli F., Vito A.**

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS POR EL MÉTODO NO  
DESTRUCTIVO DE ULTRASONIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE  
TIEMPO DE VUELO EN MODO DE TRANSMISIÓN.**

Tutor Académico: Ing. Jorge Perdigón Terán.

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico  
Por el bachiller  
**Massarelli F., Vito A.**

Caracas, 2012



## ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller:

*Vito Ángel Massarelli Flores*

Titulado

**“Evaluación de Juntas Soldadas por el Método No Destructivo de Ultrasonido, Mediante la Técnica de Tiempo de Vuelo en Modo de Transmisión”**

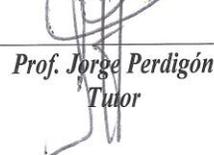
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los once días del mes de junio del año dos mil doce.

  
Prof. Demian Pereira  
Jurado



  
Prof. Juan García  
Jurado

  
Prof. Jorge Perdígón  
Tuor

## **DEDICATORIA**

A mis Padres, mi Hermano, Mia, a cada uno de mis amigos que me apoyo y a todo aquel que pensó que esta meta era imposible.

## AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por darme la oportunidad de formarme como profesional, por enriquecerme con valores y principios.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarme un espacio para crecer, madurar y superar todos los obstáculos que estaban en el camino.

A mis Padres por inculcarme los principios y valores que día a día me permiten concretar ideas.

A mi Hermano, por apoyarme siempre incondicionalmente, en todo momento.

En especial a Rafael García, Emmanuel Carrillo, Miguel Castro, Alix Hernández, Paola Delgado y Wilmer Torres, por el apoyo brindado siempre.

A Miguel González, Neidys Avillares, Carlos Raúl Gómez, Marcos Aguilar, Luis Fernández, Jeyson Bracoviche, Omar Corredor, Ing. José Robaina, Ing. Carlos Loreto, Prof. José Luis Perera, por apoyarme en cada momento difícil durante la carrera y la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Al Prof. Hans García por su pronta orientación y apoyo cuando fue requerido.

Al Prof. Demian Pereira por todo el apoyo prestado en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Central de Venezuela, al Prof. Elías Cuartin por el apoyo prestado en el suministro de los equipos de instrumentación utilizados.

Al Prof. Ramón Sánchez por brindarme el voto de confianza que necesitaba para culminar esta meta.

A Mayerlyn Torres por apoyarme, creer en mí y sobretodo por entrar a mi vida.

En especial al Ing. Jorge Perdigón, mentor, tutor, padrino, amigo y hermano por apoyarme de forma constante e incondicional en cada momento de este trayecto.

**Massarelli F., Vito A.**

**EVALUACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS POR EL MÉTODO NO  
DESTRUCTIVO DE ULTRASONIDO MEDIANTE LA TÉCNICA DE  
TIEMPO DE VUELO EN MODO DE TRANSMISIÓN.**

**Tutor Académico: Prof. Jorge Perdigón. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de  
Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2012, 152 páginas.**

**Palabras claves:** TOFD, Time of flight of diffraction, Tiempo de Vuelo en modo de transmisión, Ensayos No Destructivos, Onda lateral, Eco de fondo, Soldadura, técnicas de inspección de soldadura, imperfecciones.

**RESUMEN.** En el presente trabajo se desarrolló una metodología que permite evaluar las imperfecciones que se presentan en uniones soldadas, para lo cual se fabricaron probetas en las cuales se introdujeron imperfecciones típicas. El ensayo consistió en la localización de las indicaciones a través de la técnica de tiempo de vuelo en modo transmisión, posteriormente se capturaron señales que son características de las imperfecciones inducidas en las probetas fabricadas y se contrastaron con juntas soldadas reales. Para obtener éstas señales se enviaron ondas longitudinales que se caracterizan por el transporte de energía de manera que al interactuar con las discontinuidades, debido a la reflexión y refracción que se da a lugar en el interno del material, capturar ésta señal en un osciloscopio digital conectado en paralelo al equipo de ultrasonido y luego transferir la información adquirida al computador por medio de una interfaz, en éste último, con la ayuda del software Matlab®, se aplica la herramienta matemática y a través de la imagen obtenida se obtienen las longitudes y espesores de las imperfecciones.

**Massarelli F., Vito A.**

**EVALUATION OF WELDED JOINTS BY ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE METHOD USING THE TIME OF FLIGHT ON MODE OF TRANSMISSION.**

**Keywords:** TOFD, Time of flight diffraction, Non-destructive tests, Lateral wave, Backwall echo, Welding , Welding inspection technique, imperfection.

**ABSTRACT.** In this paper we developed a methodology to evaluate the imperfections that occur in welded joints, for which specimens were fabricated in which typical imperfections were introduced. The test consisted of the location of the information through the time of flight technique in transmission mode, subsequently captured signals which are characteristic of imperfections induced in the specimens manufactured and welded joints were tested with real. For these signals are sent longitudinal waves which are characterized by the transport of energy so that by interacting with the discontinuities, due to reflection and refraction given to place in the internal material, capturing this signal into a digital oscilloscope connected parallel to the ultrasound equipment and then transfer the information acquired to the computer via an interface, in the latter, with the help of Matlab ® software, the mathematical tool is applied and through the resulting image obtained lengths and thicknesses imperfections.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	12
CAPÍTULO I.....	13
Planteamiento del Problema.....	13
1.1. Motivación .....	13
1.2. Antecedentes de la investigación .....	14
1.3. Justificación e importancia.....	16
1.4. Objetivos .....	17
1.4.1. Objetivo General .....	17
1.4.2. Objetivos Específicos.....	17
1.5. Alcances .....	18
CAPITULO II .....	19
Marco referencial teórico .....	19
2.1. Clasificación de los materiales.....	19
2.1.2. Materiales polímeros.....	20
2.1.3. Materiales metálicos.....	20
2.2. Propiedades de los metales.....	25
2.3. Ensayos mecánicos destructivos .....	25
2.3.1. Ensayo de tracción .....	26
2.3.2. Ensayo de impacto Charpy.....	26
2.3.3. Ensayo de dureza superficial.....	27
2.4. Discontinuidades .....	27
2.4.2. Clasificación de las discontinuidades.....	28

## ÍNDICE GENERAL

---

2.4.2.1. Según su forma: .....	28
2.4.2.2. Según su ubicación.....	28
2.4.2.3. Según la vida de los materiales .....	29
2.5. Ensayos no destructivos .....	29
2.5.1. Técnicas de inspección superficial.....	31
2.5.1.1. Inspección visual (VT del inglés Visual Testing).....	31
2.5.1.2. Líquidos penetrantes (PT del inglés Penetrant Testing) .....	32
2.5.1.3. Partículas Magnéticas (MT del inglés Magnetic Testing) .....	33
2.5.1.4. Electromagnetismo (ET) .....	34
2.5.1.5 Radiografía Industrial (RT de inglés Radiographic Testing).....	35
2.5.2. Técnicas de inspección de la integridad o hermeticidad.....	37
2.5.3. Técnicas de inspección volumétrica.....	37
2.6. Radiación.....	37
2.6.1. Radiación Ionizante.....	38
2.6.2. Radiación No Ionizante.....	38
2.7. Ultrasonido.....	39
Ventajas y desventajas del ensayo por ultrasonido .....	41
2.7.1. Naturaleza y propiedades de las ondas ultrasónicas .....	43
2.7.2. Propagación de las ondas ultrasónicas en diversos medios .....	45
2.7.3. Parámetros.....	46
2.7.4. Ondas mecánicas.....	47
2.7.4.1. Tipos de onda .....	48
2.7.5. Formas de ondas.....	50

## ÍNDICE GENERAL

---

2.10.1. Aproximación de un rayo en óptica geométrica. ....	52
2.10.2. La onda bajo reflexión .....	53
2.11. Tiempo de vuelo de difracción.....	56
2.11.1. Configuración básica de un sistema de tiempo de vuelo de difracción .....	56
2.11.2. Despliegue de una imagen de tiempo de vuelo de difracción .....	58
2.11.3. Como se ve una indicación con la técnica de tiempo de vuelo de difracción.	61
CAPÍTULO III .....	63
Metodología de la Investigación .....	63
3.1. Diseño y fabricación de patrones de referencias sobre secciones de pletina. ....	65
3.2. Diseño y fabricación de patrones de referencias con indicaciones circulares. ....	66
3.3. Realización de cálculos geométricos para determinar la separación óptima entre las zapatas piezoeléctricas.....	67
3.4. Ensamblado del equipo de tiempo de vuelo de difracción.....	68
3.4.1 Frecuencia y longitud de onda .....	68
3.5. Calibración de equipo de ultrasonido y osciloscopio.....	69
3.6. Conexión del equipo de ultrasonido, con el de tiempo de vuelo de difracción y el osciloscopio digital .....	70
3.7. Realización del barrido a los patrones de referencias con indicaciones de entallas con el equipo de tiempo de vuelo de difracción usando zapatas de 60° y palpadores 10 MHz. ....	71
3.8. Realización del barrido a los patrones de referencias con indicaciones circulares con el equipo de tiempo de vuelo de difracción usando zapatas de 60° y palpadores 10 MHz. ....	72
3.9. Toma de datos del equipo de ultrasonido y visualización de la señal en el osciloscopio digital. ....	73

## ÍNDICE GENERAL

---

3.10. Creación de la matriz de datos en la hoja de cálculo. ....	74
3.11. Ejecución de programa de generación de imagen usando los puntos de la matriz .....	75
3.12. Generar imagen de tiempo de vuelo de difracción.....	76
3.13. Adquisición de datos del patrón de referencia calibrado (Sección de lámina soldada). ....	77
3.14. Realización del barrido a la sección de lámina soldada. ....	78
3.15. Radiografía de la sección de lámina soldada. ....	80
3.16. Efectuar comprobación sobre sección de lámina soldada con defectos conocidos. ....	81
3.17. Análisis e interpretación de resultados.....	81
CAPÍTULO IV .....	82
Resultados y análisis de resultados .....	82
4.1. Patrones de referencias con entallas.....	82
4.2. Patrones de referencias con indicaciones circulares .....	87
4.3. Sección de lámina soldada. ....	94
4.3 Ensayo radiográfico realizado al patrón de referencia calibrado .....	101
4.4 Calculo de tiempo de vuelos y errores .....	102
CONCLUSIONES .....	107
RECOMENDACIONES .....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
APÉNDICE .....	121

---

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de soldadura están continuamente presentes en nuestro entorno, debido a que cualquier tipo de construcción obliga a unir diferentes piezas, conjuntos o subconjuntos, hasta llegar a conseguir el objetivo deseado, bien sea un avión, barco, vehículo, máquina, puente o cualquier tipo de pieza o estructura.

Bien sea que se desee controlar los resultados obtenidos desde su manufactura o realizar una inspección de su operatividad cuando las mismas se encuentren operativas, para realizar un buen control de calidad de las soldaduras existen 2 agrupaciones de ensayos: 1) Los ensayos destructivos donde, como el propio nombre indica, se destruye la muestra utilizada, como por ejemplo, probetas obtenidas de la zona soldada o una pieza concreta para comprobar el comportamiento de una soldadura. 2) El otro tipo de ensayos de los que se dispone son los ensayos no destructivos, con los cuales no se deteriora la pieza o conjunto fabricado que se pretende inspeccionar. <sup>[17]</sup>

Tanto los ensayos destructivos como los no destructivos resultan cada vez más habituales en el ambiente industrial, unos más fáciles de realizar que otros y en algunos ocasiones, más costosos. El interés particular del presente Trabajo Especial de Grado radica en la aplicación de un método de ensayo no destructivo por el método de ultrasonido industrial mediante la técnica de tiempo de vuelo de difracción (conocido en inglés como time of flight of diffraction **TOFD**), la cual se ha venido empleando con mayor frecuencia en la industria debido a que puede ser aplicada en materias primas, procesos de fabricación, productos terminados y en especial, a componentes que se encuentran en servicio sin afectar su operatividad.

---

## CAPÍTULO I

### Planteamiento del Problema

#### 1.1. Motivación

En la evaluación de los materiales en manera especial en piezas que han sido soldadas, se requiere una verificación de la manera como se llevó a cabo y la calidad de dicho proceso; adicional a esto, dentro del mantenimiento predictivo y preventivo de sistemas que se encuentran operativos, es indispensable una revisión constante, pues la presencia de grietas, espacios con falta de aporte de material, escoria y en general, imperfecciones en la soldadura, visibles o no pueden causar el rompimiento o fallas de las piezas.

Las pruebas para las caracterizaciones de materiales, destructivas y no destructivas, generalmente son utilizadas para calificar el material sobre la base de los estándares predefinidos por diseño o de especificaciones particulares de calidad. Las pruebas destructivas se distinguen por muestreo y sacrificio del producto para valorar el nivel de calidad del proceso desarrollado en él, mientras que las pruebas no destructivas se distinguen por calificar el sistema sin destruirlo.

Dentro de los ensayos no destructivos, el método de ultrasonido industrial se ha empleado junto a otros métodos, para la búsqueda de interrupciones en la superficie y en el volumen de estructuras metálicas. Durante años el método de ultrasonido basadas en las leyes de reflexión, han acompañado a la radiación ionizante por gammagrafía y rayos X en la detección de discontinuidades estructurales en piezas metálicas, polímeros y otros materiales. Otros métodos complementarios, como líquidos penetrantes y partículas magnéticas, han estado más orientadas a la búsqueda de imperfecciones superficiales. [8]

Como consecuencia de los problemas en la aplicación y seguridad que representa el uso de los rayos X y gammagrafía, se ha planteado en los últimos años, una posible sustitución por diversas técnicas ultrasónicas que han venido evolucionando debido al desarrollo de la electrónica digital, así como también, de nuevos materiales para la fabricación de transductores piezoeléctricos. <sup>[17]</sup>

Motivado a lo antes expuesto, se plantea la necesidad de desarrollar una técnica de inspección por ultrasonido industrial, aplicando campos de radiación de ondas mecánicas, con la finalidad de mejorar el análisis de las discontinuidades estructurales en juntas soldadas, utilizando equipos convencionales con el objetivo adicional de disminuir los costos asociados a la adquisición de equipos de última generación.

### **1.2. Antecedentes de la investigación**

En el estudio que se realizó en el presente Trabajo Especial de Grado, fueron evaluadas diferentes patrones de referencias planos con espesores entre 9,00 y 13,00 milímetros, con fallas fabricadas con el objetivo de parametrizar las señales emitidas por el equipo de ultrasonido de campo, con el fin de demostrar que es posible realizar la detección, dimensionamiento y procesamiento de imagen de barrido de cada falla usando la técnica de tiempo de vuelo de difracción con solo un palpador emisor y otro receptor teniendo como fuente de emisión de señal un equipo de ultrasonido de campo y con la ayuda de un osciloscopio digital que permitirá visualizar fácilmente el comportamiento la forma de cada onda.

Se presentarán algunos trabajos experimentales como antecedentes referentes al uso de la técnica de tiempo de vuelo de difracción en pequeños espesores.

En Abril del año 2000, Shyamal Mondal y el Dr. Sattar, T. <sup>[25]</sup> Publicaron el trabajo titulado “An Overview TOFD method and its mathematical model”, en el cual se

explica el procedimiento para realizar los cálculos de dimensionamiento de las fallas en pequeños espesores, así como las ventajas y desventajas de la técnica y comparaciones entre el procedimiento de forma manual y de forma automática. El propósito del experimento es comparar los resultados entre el modo manual de la técnica de tiempo de vuelo de difracción haciendo uso de un equipó de ultrasonido industrial convencional con la precisión obtenida mediante el uso de la radiografía industrial

En el año 2002, Baby, S., Balasubramanian, T., Pardikar, R.J. <sup>[26]</sup>, Palappaniapan, M. y Subbaratnam, R., publicaron el trabajo titulado “Time of flight diffraction technique for accurate sizing of surface breaking cracks”. En dicho estudio experimental se evaluaron patrones de referencias con ranuras fabricadas de diferentes dimensiones, localizaciones y posiciones para la determinación de las dimensiones de las grietas de ruptura superficiales abordando la tarea de forma manual. El estudio trajo como resultado que las imágenes analizadas para dimensionamiento tenían un error promedio para la profundidad es de  $\pm 0,13$  en las ranuras verticales y  $\pm 0,05$  en donde el error promedio en la longitud es  $\pm 0,36$  para las ranuras verticales y  $\pm 0,29$  en las inclinadas. Se encontró dificultad en fallas con dimensiones de profundidad menores a 2 mm debido a la presencia de la onda lateral.

Posteriormente en el 2006, Zahran, O y Al-Nuaimy, W. <sup>[23]</sup>, realizan la publicación titulada “Image Processing for Accurate Sizing of Weld Defects Using Ultrasonic Time-Of- Flight Diffraction”. En este trabajo se amplía la metodología para el procesamiento de imágenes con la data obtenida luego del escaneo de la probeta de interés y disminución del error en los cálculos de dimensionamiento de las fallas detectadas. Los resultados de la aplicación de estas técnicas a los datos disponibles han sido muy prometedores en términos de velocidad, robustez, precisión y fiabilidad cuando se trata con datos muy variables. Esto haría que el sistema propuesto adecuado para la puesta en práctica en situaciones que requieren casi en tiempo real de procesamiento e interpretación de los grandes volúmenes de datos y por tanto;

estas técnicas se espera que reduzcan en gran medida la posibilidad de error humano y experimental, debido a la pérdida de la concentración y la fatiga visual y la dependencia de la intervención de un operador capacitado, podría abrir un nuevo paradigma en la técnica de tiempo de vuelo de difracción para la interpretación automática.

### **1.3. Justificación e importancia**

En los procesos industriales donde se fabrican estructuras que requieren componentes de metal unidos mediante el proceso de soldadura, como es el caso de la industria naval, automotriz, petrolera y toda aquella que involucre procesos de fabricación, es posible observar la necesidad de realizar controles durante la fabricación, construcción, puesta en servicio y paradas para realizar mantenimiento preventivo, donde se debe identificar y verificar la existencia de algún daño que pudiera ocurrir en cada una de estas etapas.

Partiendo del hecho de que los ensayos no destructivos mediante la aplicación del método de ultrasonido industrial son convenientes para la evaluación de discontinuidades volumétricas y planares, la técnica del tiempo de vuelo de difracción (conocido en inglés como time of flight of diffraction **TOFD**), es considerada uno de los métodos más rápidos dentro de estos ensayos, ya que es posible caracterizar un cordón de soldadura a ciertos grados con un solo escaneo a lo largo de toda su longitud con dos sondas, a partir de lo cual se crea una imagen completa del cordón que muestra su constitución y más importante aún, información sobre cualquier imperfección en el mismo.

Investigaciones experimentales previas han demostrado que la técnica del tiempo de vuelo de difracción (TOFD) es una nueva y eficaz herramienta a mejorar en lo referente a la inspección de cordones de soldadura, ya que la misma es capaz de detectar imperfecciones que normalmente son determinados por radiografía o la

tradicional prueba de ultrasonido de pulso-eco. Para realizar esto, se llevó a cabo un estudio mediante la técnica de TOFD a probetas de acero soldadas con discontinuidades conocidas, localizadas y dimensionadas, a fin de poder evaluarlas mediante el proceso de ultrasonido propuesto. El beneficio de realizar el estudio de dichas discontinuidades es crear un patrón que permitirá una clasificación de las discontinuidades según la señal emitida.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Caracterización de discontinuidades a partir del método de ultrasonido mediante la técnica de Tiempo de Vuelo de Difracción.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Diseño y fabricación de soporte de zapata angular.
- Diseño y fabricación de soporte angular de zapatas.
- Diseño y fabricación de patrones de referencia.
- Diseño y fabricación de patrones para la determinación de ángulo de incidencia.
- Obtener ondas por difracción.
- Caracterizar las ondas obtenidas como una función del tipo de indicación.
- Obtener representativos gráficos por cada tipo de indicación de patrón.
- Desarrollar un prototipo para la obtención en el plano X-Y de la distancia proyectada contra longitud de inspección.
- Contrastar la representación gráfica de la señal en el plano X-Y contra las indicaciones en A- Scan y contra el tipo de indicación.

### **1.5. Alcances**

La finalidad del presente estudio es la de suministrar información a la industria manufacturera y mantenimiento sobre la importancia de la evaluación de la confiabilidad mediante la aplicación de ensayos no destructivos por ultrasonido.

Adicional a esto, permite caracterizar las indicaciones debidas a las interrupciones por discontinuidades en las juntas soldadas de acero al carbono, mediante la aplicación de la técnica conocida como TOFD.

Y finalmente, con el presente Trabajo Especial de Grado se busca desarrollar una metodología para obtener la difracción de onda mediante la utilización de equipos convencionales, con el objetivo de disminuir los costos debidos a la adquisición de equipos de última generación.

---

## **CAPITULO II**

### **Marco referencial teórico**

En el desarrollo del capítulo se detalla la información necesaria para la comprensión del estudio que se llevó a cabo, tales como la clasificación de los materiales, haciendo énfasis en los metales y sus propiedades, seguido de los ensayos destructivos; se definirán los conceptos de las discontinuidades y la relevancia de detectarlas en la manufactura e inspección de sistemas que se encuentran operativos, se puntualizan los conceptos de ensayos no destructivos, su clasificación y diversos tipos, se profundiza en cuanto al método por ultrasonido y la radiación, para posteriormente explicar la técnica que se empleó en el presente proyecto denominada Tiempo de Vuelo de Difracción.

#### **2.1. Clasificación de los materiales.**

La ciencia de los materiales los clasifica en función de sus propiedades y su estructura atómica de la manera siguiente:

##### **2.1.1. Materiales cerámicos.** <sup>[1][2]</sup>

Los materiales cerámicos son combinaciones de elementos metálicos y no metálicos que forman compuestos duros, frágiles y de alto punto de fusión. Los cerámicos típicos son los aisladores eléctricos y térmicos, con buena estabilidad química y buena resistencia a la compresión.

Sin embargo, los materiales cerámicos inevitablemente contienen fallas. Dado que el cerámico por ser frágil, no puede ser deformado plásticamente, estas fallas limitan su capacidad de resistir cargas bajo estados de esfuerzos. Como la naturaleza de las fallas cambia de una pieza a la siguiente, diseñar componentes cerámicos para

aplicaciones críticas es más difícil e incierto que con los metales. La estadística de Weibull es importante para la determinación de la sensibilidad del material a las fallas.

En los materiales cerámicos aparecen 3 microestructuras básicas: a) cristalina, b) vítrea y c) una mezcla cristalina y vítrea.

### **2.1.2. Materiales polímeros** <sup>[2]</sup>

Los polímeros son moléculas grandes de alto peso molecular, producidos al unir moléculas más pequeñas que se conocen como monómeros. En comparación con la mayoría de los metales, los polímeros tienen baja resistencia, rigidez sin embargo poseen baja densidad y buena resistencia química.

Los polímeros termoplásticos son cadenas lineales, que permiten conformar fácilmente el material en formas útiles, con buena ductilidad y que se puedan reciclar de manera económica. Los termoplásticos pueden tener una estructura amorfa, que les dé baja resistencia y buena ductilidad, siempre y cuando la temperatura ambiente esté por arriba de su temperatura de transición vítrea. Los polímeros son más rígidos y frágiles cuando la temperatura cae por debajo de la temperatura de transición vítrea (La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de un material no cristalino. Es la temperatura crítica a la cual el material cambia su comportamiento como "vidrioso" y pasa a comportarse como "gomoso". En este contexto "vidrioso" significa duro y quebradizo (y consecuentemente relativamente fácil de romper), mientras que "Gomoso" significa elástico y flexible). Muchos termoplásticos también se cristalizan parcialmente incrementando su resistencia.

### **2.1.3. Materiales metálicos** <sup>[2]</sup>

Los metales y sus aleaciones, generalmente tienen como característica buena conductividad eléctrica y térmica, resistencia relativamente alta, alta rigidez,

ductilidad o conformabilidad y resistencia al impacto. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque en ocasiones se utilizan metales puros, las combinaciones de metales conocidas como aleaciones proporcionan mejoría en alguna propiedad particularmente deseable o permiten una mejor combinación de propiedades. Los metales a su vez se clasifican en:

**Ferrosos:** Los aceros son aleaciones de hierro y carbono que pueden contener cantidades apreciables de otros elementos de aleación. Existe una gran cantidad de aleaciones con diferentes composiciones químicas, lo cual hace que existan aleaciones con propiedades mecánicas muy amplias. Las propiedades mecánicas de los aceros son sensibles al porcentaje de carbono, el cual normalmente es menor al 1%.

Algunos aceros más comunes se clasifican de acuerdo a su concentración de carbono: bajo, medio y alto carbono. Las características principales de estas aleaciones son las siguientes:

a) Aceros de bajo carbono: Son los que se producen comercialmente en mayor cantidad.

- Generalmente contienen menos de 0,25% de carbono en peso de aleación.
- No responden a tratamientos térmicos que forman martensita.
- Su incremento en la resistencia puede lograrse mediante el trabajo en frío.
- Su microestructura consiste en ferrita y perlita (ferrita: solución sólida de átomos de carbono intersticiales en el hierro, perlita: estructura laminar de ferrita y  $Fe_3C$ , que se desarrolla en el sistema hierro-carbono).
- Son aleaciones relativamente suaves y débiles pero con una ductilidad y tenacidad sobresalientes. Son maquinables y soldables.
- Son las que tienen más bajo costo de producción.
- Sus aplicaciones típicas son: componentes de automóviles, perfiles estructurales, láminas y tuberías.

b) Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA)

- Contienen elementos de aleación como cobre, vanadio, níquel y molibdeno en concentraciones combinadas de 10 % de peso en aleación o menos.
- Poseen mayor resistencia mecánica que los aceros bajos en carbono.
- Mucho de ellos pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Además son dúctiles, hechurables y mecanizables.
- En condiciones normales, los aceros HSLA son más resistentes a la corrosión que los aceros al carbono.

c) Aceros de medio carbono

- Tienen concentraciones de carbono entre 0,25% y 0,60% en peso de la aleación.
- Pueden ser tratados térmicamente por austenización, temple y revenido. Normalmente se utilizan en condiciones de revenidos, con microestructura de martensita revenida.
- Los aceros no aleados (al carbono) son menos dúctiles y tenaces; sólo pueden tratarse térmicamente en secciones delgadas y con elevada rapidez de enfriamiento.
- Al añadir cromo, níquel y molibdeno se mejora la capacidad de estas aleaciones de ser tratadas térmicamente. Estas aleaciones tienen mayor resistencia que los aceros de bajo carbono pero desmejorando ductilidad y tenacidad.
- Se utilizan en aplicaciones que requieren la combinación de elevada resistencia, resistencia al desgaste y tenacidad.

d) Aceros de alto carbono.

- Su contenido de carbono varía entre 0,6 y 1,4 % en peso de la aleación
- Son los aceros más resistentes y menos dúctiles de los aceros al carbono.

- Casi siempre se utilizan revenidos, por ello tienen una resistencia al desgaste especial y son capaces de mantener un filo cortante.
- Los aceros para herramienta caen dentro de la categoría de aceros de alto carbono. Contienen cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno. Esos elementos de aleación se combinan con el carbono para formar carburos muy duros y resistentes al desgaste (  $Cr_{23}C_6$  ,  $V_4C_3$  , WC ). Se utilizan para fabricar herramientas de corte.

e) Aceros inoxidable.

- Poseen una resistencia elevada a la corrosión en una variedad de entornos, especialmente al ambiente.
- El elemento principal de aleación es el cromo (se requiere al menos 11% de cromo en el acero). La resistencia a la corrosión puede mejorarse al añadir níquel y molibdeno.
- Se clasifican en: martensítico, ferrítico, austenítico, dúplex (austenita más ferrita) y los endurecibles por precipitación.
- Los aceros inoxidable austenítico son los que tienen mayor resistencia a la corrosión debido a su contenido elevado de cromo. Los austeníticos son no magnéticos.
- Los aceros inoxidable martensíticos y ferríticos son magnéticos.

**No Ferrosos:** Las aleaciones no ferrosas, las basadas en metales distintos al hierro, tienen una enorme cantidad de propiedades físicas y mecánicas. De un grupo de aleaciones a otro, se encuentran extremos de densidad, resistencia específica, temperatura de fusión y resistencia a la corrosión.

Los “metales ligeros” incluyen aleaciones de baja densidad basadas en aluminio, magnesio y berilio. Estas, en función de su baja densidad, tienen una elevada resistencia específica y como resultado, se encuentran en un gran número se aprovecha la excelente resistencia a la corrosión y la conductividad eléctrica del

aluminio. En estas aleaciones, el proceso de endurecimiento más importante y poderoso es el envejecimiento. El aluminio y magnesio están restringidos a usos a baja temperatura, debido a la pérdida de sus propiedades mecánicas como resultado la recristalización.

Por otra parte el Berilio, con una excepcional relación resistencia-peso mantiene su resistencia a altas temperaturas y es inusualmente rígido.

Las aleaciones de titanio tienen densidades y resistencias a las temperaturas intermedias, junto con una excelente resistencia a la corrosión, lo cual las hace útil en aplicaciones aeroespaciales y en procesos químicos. Estas aleaciones muestran una poderosa respuesta al endurecimiento por envejecimiento y a tratamientos térmicos.

Las aleaciones de níquel y cobalto, incluyendo las súper-aleaciones también tienen buenas propiedades, incluso a temperaturas mayores. Esto en combinación con su buena resistencia a la corrosión, hace que estas aleaciones encuentren mucho uso en motores de aeronaves y en equipos de procesos químicos. Generalmente su endurecimiento se obtiene, por el envejecimiento o mediante los endurecimientos por solución sólida y por dispersión debido a los carburos de aleación.

Sin embargo, los metales refractarios pueden operar a temperaturas todavía más elevadas aunque deben ser protegidos contra la oxidación mediante atmósferas o recubrimientos apropiados.

Las aleaciones de cobre pueden endurecerse utilizando todos los tratamientos térmicos conocido, se les encuentra en una gran cantidad de aplicaciones, particularmente en la electrónica; además en la generación y transmisión de energía eléctrica y en el procesamiento de productos químicos.

## **2.2. Propiedades de los metales <sup>[1]</sup>**

Las principales propiedades de los materiales incluyen densidad, expansión térmica, conductividad térmica, propiedades eléctricas y magnéticas, así como las propiedades de mecánicas.

En los procesos de manufactura son de gran importancia las propiedades mecánicas de las que destacan las siguientes: resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, resistencia a la torsión, ductilidad, prueba al impacto o de durabilidad, dureza.

## **2.3. Ensayos mecánicos destructivos <sup>[3] [4]</sup>**

El empleo exitoso de los metales en aplicaciones de ingeniería se debe a la habilidad del metal en satisfacer los requerimientos de diseño y servicio. La capacidad del metal de satisfacer estos parámetros están determinados por las propiedades químicas y mecánica del metal. Las propiedades físicas son aquellas medidas por métodos que no requieren de una fuerza mecánica externa, tales como la densidad, propiedades magnéticas, etc.

En cuanto a las propiedades mecánicas son descritas como la relación entre las fuerzas (o esfuerzos) actuando en el material y la resistencia del material a ser deformado o fracturado. Sin embargo, esta deformación no siempre es apreciable en el metal luego de remover la carga aplicada. Diferente tipos de ensayos son realizados usando la fuerza, los cuales permiten medir las propiedades del metal, su modulo de elasticidad, deformación plástica y elástica, dureza, resistencia a la fatiga y resistencia a la fractura, entre otros.

### **2.3.1. Ensayo de tracción** <sup>[3]</sup> <sup>[4]</sup>

Para conocer las cargas que pueden soportar los materiales se efectúa éste ensayo donde se coloca una probeta en una máquina de ensayo consistente de dos mordazas, una fija y una móvil. La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas poseen un graficador que coloca en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil.

### **2.3.2. Ensayo de impacto Charpy** <sup>[3]</sup> <sup>[4]</sup>

El ensayo de impacto Charpy consiste en dejar caer un peso (péndulo), el cual a su paso golpea una probeta que tiene forma paralelepípeda ubicada en la base de la máquina. La probeta posee un entalle estándar para facilitar el inicio de la fisura; entre ellos está el entalle que recibe el nombre de V-Notch. Luego de golpear la probeta, el péndulo sigue su camino alcanzando una cierta altura que depende de la cantidad de energía disipada al golpear. Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, en cambio aquellas con mayor ductilidad se deforman sin romperse. Este comportamiento es muy dependiente de la temperatura y la composición química, esto obliga a realizar el ensayo con probetas a distinta temperatura, para evaluar la existencia de una "temperatura de transición dúctil-frágil".

### 2.3.3. Ensayo de dureza superficial <sup>[3][4]</sup>

Es la resistencia de un material a ser marcado por otro. Se prefiere el uso de materiales duros cuando éstos deben resistir el roce con otros elementos. La clasificación y los métodos varían con cada material, dando origen a los números de dureza como son HBN (Hardness Brinell Number), HRA, HRB, HRC (Hardness Rockwell series A, B, C,) y HVN (Hardness Vickers Number), entre otros. Además de los ensayos anteriormente expuestos, existen otros ensayos particulares para evaluar la capacidad de un material para una aplicación específica.

### 2.4. Discontinuidades <sup>[5]</sup>

Las discontinuidades son interrupciones en la estructura física del material. Se considera que la discontinuidad es un defecto cuando la misma constituye un peligro para el funcionamiento idóneo de la soldadura. La significancia de la discontinuidad en la soldadura debe ser vista bajo el contexto de la idoneidad para el propósito que debe cumplir la soldadura o ensamble soldado; siendo esta idoneidad un balance entre la calidad, confiabilidad y economía del procedimiento de soldadura. Existen normas y códigos de aceptación que son usados cuando una discontinuidad ha sido claramente localizada, identificada, medida, determinada su orientación y su significancia estructural cuestionada. Se considera que una discontinuidad es aceptable cuando la misma no sacrifica la confiabilidad de la soldadura o ensamble soldado.

Las características de las discontinuidades abarcan un análisis específico de cada una de ellas, estas características son:

- Ubicación de la discontinuidad: Estas pueden ser superficiales, subsuperficiales o internas; esto se debe a múltiples factores, tanto en la etapa de manufactura como en el servicio.

- Orientación de la discontinuidad: La orientación de las discontinuidades en algunos casos como en elementos sometidos a estados de esfuerzos de tracción es un importante indicio para la aplicación del criterio de identificación de discontinuidades.
- Forma de la discontinuidad: Estas pueden ser planas, esféricas, cilíndricas, etc. Según esta forma las discontinuidades pueden ser menores o mayores concentradores de esfuerzo.

#### **2.4.1. Indicaciones y defectos <sup>[5]</sup>**

**Indicación:** Es la respuesta o evidencia de una respuesta, que se obtiene al aplicar un ensayo no destructivo.

**Defecto:** es una discontinuidad con dimensiones que no son aceptables por alguna norma o especificación de diseño.

#### **2.4.2. Clasificación de las discontinuidades <sup>[5]</sup>**

Las discontinuidades se pueden clasificar de la siguiente manera:

##### **2.4.2.1. Según su forma:**

- Esféricas, cilíndricas o volumétricas.
- Planares.
- Aglomerados micro o macroscópicos.

##### **2.4.2.2. Según su ubicación <sup>[5]</sup>:**

- Superficiales: Grietas, porosidades abiertas, rechupes, cortaduras, solapamientos, desgarraduras por solidificación.

- Internos: Cavidades gaseosas, porosidades tubulares, escorias, inclusiones, segregaciones, rechupes internos, delaminaciones, capas de inclusiones, grietas, roturas por aplicación de relajación a temperaturas inadecuadas, falta de unión, solapaduras, discontinuidades típicas de la soldadura (falta de fusión, falta de penetración, inclusiones de escoria), entre otras.

#### **2.4.2.3. Según la vida de los materiales <sup>[5]</sup>:**

- Inherentes o natos: Generados durante la constitución de los materiales.
- De procesamiento: Se generan durante el procesamiento de los materiales para obtener productos semi-terminados o acabados.
- De servicios: Son generados durante el tiempo de operación, por ejemplo grietas de fatiga, picaduras y reducción de espesor debido a la corrosión, empollamientos y grietas por daños por hidrógeno, entre otros.

#### **2.5. Ensayos no destructivos <sup>[6] [7] [8]</sup>**

Los ensayos no destructivos, (END), son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente, las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado con sus productos.

Los ensayos no destructivos, tienen por objeto el análisis de materiales componentes sin afectar sus propiedades físicas y químicas, dejándolos aptos para su uso posterior.

El desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización de los productos o requisitos de seguridad, como es el caso de la industria aeroespacial, la nucleoelectrónica o la petroquímica, impusieron también nuevas condiciones de inspección, en las cuales se estableció la necesidad de verificar hasta en un 100% los componentes críticos; lo

que planteó una severa dificultad a los departamentos de calidad, hasta que iniciaron el empleo de técnicas de inspección, diferentes a la visual, con los cuales se medía la integridad de los componentes sin destruirlos. Esto se hizo posible al medir alguna otra propiedad física del material y que estuviera relacionada con las características críticas del componente sujeto a inspección; es decir, se inició la aplicación de las pruebas no destructiva, las cuales actualmente son de uso común en casi todos los sectores industriales.

Los ensayos no destructivos son la de mediciones de propiedades indirectamente, como es la transmisión de ondas mecánicas, la opacidad al paso de la radiación, etc. y que tienen la finalidad de verificar las condiciones de las piezas examinadas. No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de la pieza, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Por lo tanto, estas complementan lo ensayos destructivos.

En la actualidad existen numerosos métodos de ensayos no destructivos, por ejemplo inspección visual, líquidos penetrantes, ensayo magnético, ultrasonido, radiografía, corrientes inducidas, pérdida de flujo magnético, termografía, emisión acústica, entre otros.

Las pruebas no destructivas, como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por ello no inutilizan las piezas que son sometidas a los ensayos y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que las componen.

### **Clasificación de los ensayos no destructivos**

La clasificación de las pruebas no destructivas se basa en la posición en donde se localizan las discontinuidades que pueden ser detectadas, por lo que se clasifican en:

### **2.5.1. Técnicas de inspección superficial**

#### **2.5.1.1. Inspección visual (VT del inglés Visual Testing) <sup>[4]</sup>**

Esta es una técnica que requiere de una gran cantidad de información de las características de la pieza a ser examinada, para una acertada interpretación de las posibles indicaciones. Está ampliamente demostrado que cuando se aplica correctamente como inspección preventiva, detecta problemas que pudieran ser mayores en los pasos subsecuentes de producción o durante el servicio de la pieza.

#### **Ventajas de la inspección visual**

- La Inspección Visual se emplea en cualquier etapa de un proceso productivo o durante las operaciones de mantenimiento preventivo o correctivo.
- Muestra las discontinuidades más grandes y generalmente señala otras que pueden detectarse de forma más precisa por otros métodos.
- Puede detectar y ayudar en la eliminación de discontinuidades que podrían convertirse en defectos.
- El costo de inspección visual es el más bajo de todos los Ensayos no Destructivos, siempre y cuando sea realizada correctamente.

#### **Limitaciones de la inspección visual**

- La calidad de la inspección visual depende en gran parte de la experiencia y conocimiento del Inspector.
- Está limitada a la detección de interrupciones superficiales.
- Cuando se emplean sistemas de observación directa, como son las lupas y endoscopios sencillos, la calidad de la inspección dependerá de la agudeza visual del inspector o de la resolución del monitor de video.
- La detección de discontinuidades puede ser difícil si las condiciones de la superficie sujeta a inspección no son correctas.

### **2.5.1.2. Líquidos penetrantes (PT del inglés Penetrant Testing) <sup>[9]</sup>**

La inspección por líquidos penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados. En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de penetrante y se aplica un revelador, que absorbe el líquido que ha penetrado en la discontinuidad y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta.

#### **Ventajas de los líquidos penetrantes**

- La inspección por Líquidos penetrantes es extremadamente sensible a las discontinuidades abiertas a la superficie.
- La inspección es realizable siempre independientemente de la configuración geométrica.
- Son relativamente fáciles de emplear.
- Brindan muy buena sensibilidad.
- Son económicos.
- Son razonablemente rápidos en cuando a la aplicación, además de que el equipo puede ser portátil.
- Se requiere de pocas horas de capacitación de los Inspectores.

#### **Limitaciones de los líquidos penetrantes**

- Aplicables a materiales no porosos.
- Se requiere de una buena limpieza previa a la inspección.
- El resultado de la prueba no destructiva es instantáneo.
- Una selección incorrecta de la combinación de revelador y penetrante puede ocasionar falta de sensibilidad en el método.

### **2.5.1.3. Partículas Magnéticas (MT del inglés Magnetic Testing) <sup>[10]</sup>**

La inspección por partículas magnéticas permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Se selecciona usualmente cuando se requiere una inspección más rápida que con los líquidos penetrantes.

El principio del método es la formación de distorsiones del campo magnético o de los polos cuando se genera o se induce éste en un material ferromagnético; es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, este se deforma o produce polo. Las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo de hierro o suspensión en la superficie sujeta a inspección y que por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta.

#### **Ventajas de las partículas magnéticas**

Con respecto a la inspección por líquidos penetrantes, este método tiene las ventajas siguientes:

- Requiere de un menor grado de limpieza
- Generalmente es un método más rápido y económico
- Puede revelar discontinuidades que se encuentra bajo la superficie de la probeta.
- Tiene una mayor cantidad de alternativa.

#### **Limitaciones de las partículas magnéticas**

- Son aplicables sólo en materiales ferromagnéticos.

- No tiene gran capacidad de penetración.
- El manejo del equipo en campo puede ser costoso.
- Generalmente requiere del empleo de energía eléctrica.
- Sólo detectan discontinuidades perpendiculares al campo magnético.

#### **2.5.1.4. Electromagnetismo (ET) <sup>[4]</sup>**

El electromagnetismo, anteriormente llamado corrientes de Eddy o de Foucault, se emplea para inspeccionar materiales que sean electroconductores, siendo especialmente aplicable a aquellos que no son ferromagnéticos. Esta técnica comienza a tener grandes aplicaciones, aun cuando ya tiene más de 50 años de desarrollo. Esta técnica cuenta con una amplia gama de alternativas, cada una con un objetivo específico de detección.

#### **Ventajas del electromagnetismo**

- Detecta y generalmente evalúa discontinuidades subsuperficiales en casi cualquier conductor eléctrico.
- En muchos casos, la inspección por electromagnetismo puede ser completamente automatizada.
- Puesto que no requiere contacto directo, puede emplearse a altas velocidades para la inspección continua a bajo costo.
- Con esta técnica es posible clasificar y diferenciar materiales de aleaciones, tratamientos térmicos o estructura metalúrgica distintos, siempre y cuando presenten una diferencia significativa de conductividad.
- Es excelente para la inspección de productos tubulares, de preferencia fabricados con materiales no ferromagnéticos, como son los empleados en algunos tipos de intercambiadores de calor, condensadores o sistemas de aire acondicionado.

### **Limitaciones del electromagnetismo**

- Debe eliminarse de la superficie cualquier tipo de contaminación o suciedad que sea magnética o eléctricamente conductora. Generalmente la bobina de prueba debe diseñarse en especial para una pieza específica.
- La profundidad de la inspección está limitada a pocos milímetros de penetración y depende de la frecuencia elegida para excitar el campo electromagnético y el tipo de material que se esté inspeccionando.
- Se requiere de gran entrenamiento para calibrar y operar adecuadamente el equipo de prueba.
- La señal es sensible a las diferencias en composición y estructura del material, lo que enmascara pequeñas fallas o proporciona indicaciones falsas.

#### **2.5.1.5 Radiografía Industrial (RT de inglés Radiographic Testing) <sup>[11] [12]</sup>**

Usa radiación electromagnética ionizante para ver elementos que no pueden ser observados de otra manera. No debe ser confundido con el uso de la radiación ionizante para cambiar o modificar la estructura del elemento, es un método de inspección de materiales para encontrar imperfecciones ocultas mediante el uso de ondas de longitud corta de la radiación electromagnética, rayos X, radiación Gamma, para penetrar una variedad de materiales.

La inspección de por radiografía industrial (RT) detecta discontinuidades microscópicas y variaciones en la estructura interna de un material; la radiografía permite obtener una imagen de la estructura interna de una pieza o componente. Durante la exposición, la energía de rayos X o gamma es absorbida o atenuada al atravesar el material; esta atenuación es proporcional a la densidad, el espesor y continuidad del material empleado. La radiación que traspasa el objeto es registrada en una placa o papel fotosensible, que posteriormente se revela para obtener la imagen del area inspeccionada o es observada en una pantalla fluorescente. Los rayos X son generados por dispositivos electrónicos y los rayos gamma por fuentes de

radiación naturales o isotopos radiactivos artificiales producidos para la radiografía industrial.

Con el propósito de determinar la sensibilidad y calidad de una radiografía, se emplean penetrámetros, cuyo espesor corresponde aproximadamente al 2% del espesor de la parte a inspeccionar, los cuales se colocan del lado de la fuente.

La radiografía industrial se utiliza para la detección de imperfecciones como grietas, socavados, penetración completa de la raíz, falta de fusión, en productos soldados, fundiciones, forjas, etc.

### **Ventajas de la radiografía industrial.**

- Se aplica a todo tipo de materiales.
- Proporciona un registro visual del interior del material inspeccionado.

### **Limitaciones de la radiografía industrial.**

- No es recomendable usarla en piezas de geometría complicada.
- La pieza de inspección debe tener al menos dos lados de acceso.
- Su empleo requiere estrictas medidas de seguridad.
- El personal, debe estar altamente capacitado, calificado y con experiencia.
- Requiere de instalaciones especiales, como el area de exposición, equipo de seguridad y cuarto oscuro para el proceso de revelado.
- Las discontinuidades del tipo laminar no pueden ser detectadas por este método.

### **2.5.2. Técnicas de inspección de la integridad o hermeticidad**

Estas pruebas proporcionan información del grado en que pueden ser contenidos los fluidos en recipientes, sin que escapen a la atmósfera o queden fuera de control. Los métodos de END de hermeticidad son:

- Pruebas de Fuga
- Pruebas por Cambio de Presión (Neumática o hidrostática).
- Pruebas de Burbuja
- Pruebas por Espectrómetro de Masas
- Pruebas de Fuga con Rastreadores de Halógeno.

### **2.5.3. Técnicas de inspección volumétrica**

Estas pruebas proporcionan información acerca de las condiciones estructurales en la zona interna de los materiales inspeccionados. Los métodos de ensayos no destructivos volumétricos son:

- Radiografía Industrial
- Ultrasonido Industrial
- Emisión Acústica

## **2.6. Radiación** <sup>[14]</sup> <sup>[16]</sup>

La radiación abarca las ondas electromagnéticas (tales como la luz, ondas de radio, rayos X, etc.), ultrasonido y partículas (tales como partículas alfa, partículas beta, etc.) emitidas por materiales radioactivos mientras decaen.

Puede ser clasificada en no ionizante e ionizante. En general, la energía de la radiación no ionizante (tal como la luz y las ondas de radio) es baja y no suficiente para cambiar las propiedades químicas de la sustancia. Por otra parte, la radiación

ionizante (tal como lo son las partículas alfa y beta) tiene suficiente energía para remover electrones desde un átomo para crear iones cargadas eléctricamente. Este proceso de ionización frecuentemente resulta en cambios en los tejidos vivos, lo que puede conducir a daños en el organismo.

La radiación no puede ser escuchada, olida o saboreada y la mayoría de ella no puede ser sentida.

### **2.6.1. Radiación Ionizante** <sup>[15]</sup>

La radiación ionizante es cualquiera de los varios tipos de partículas y rayos emitidos por material radiactivo, equipos de alto voltaje, reacciones nucleares y las estrellas. Los tipos que son generalmente importantes para su salud son las partículas alfa y beta, los rayos X y los rayos gama.

Las partículas alfa y beta son pequeños fragmentos de alta velocidad, emitidos por átomos radiactivos cuando se transforman a otra sustancia. Los rayos X y los rayos gama son tipos de radiación electromagnéticas. Estas partículas de radiación y rayos poseen suficiente energía para desplazar electrones de átomos y moléculas (tales como agua, proteína y DNA) a los que impactan o que pasan cerca. Este proceso es llamado ionización, por lo que esta radiación se llama "radiación ionizante."

### **2.6.2. Radiación No Ionizante** <sup>[16]</sup>

A diferencia de las radiaciones ionizantes, las radiaciones no ionizantes (RNI) no llevan asociada una energía suficiente para producir el proceso de ionización anteriormente mencionado, causal de los efectos no deseables.

Las radiaciones electromagnéticas no ionizantes abarcan prácticamente todo el espectro electromagnético. Dichas radiaciones no pueden ser percibidas por los sentidos humanos, a menos que su intensidad alcance valores suficientemente

grandes como para manifestarse a través de sus efectos térmicos. La excepción es una banda muy angosta, dentro del espectro visible que si es percibida por el sentido de la vista. Las diferentes longitudes de onda, la energía y la tasa de absorción específica aún dentro de un mismo tipo de radiación, deben tenerse en cuenta al momento de establecer los márgenes de seguridad.

Radiación no ionizante es el término que se le da a la radiación en la parte del espectro electromagnético donde no hay suficiente energía, eso incluye a los campos eléctricos y magnéticos, ondas de radio, microondas, infrarrojo, ultravioleta y radiación visible.

Un ejemplo de radiación no ionizante es el ultrasonido, es una onda de alta frecuencia usada para crear imágenes para tratamiento diagnóstico.

### **2.7. Ultrasonido** <sup>[17]</sup>

Los ultrasonidos son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas, diferenciándose de éstas en que su campo de frecuencias se encuentra por encima de la zona audible. Por los fenómenos que provocan en su propagación a través de los sólidos, líquidos y gases han dado lugar a la aparición de numerosas aplicaciones técnicas y científicas. El desarrollo reciente de la adquisición y presentación de datos, asociado a la tecnología de la información, ha tenido como resultados un nuevo período de expansión que, previsiblemente, se extenderá en los próximos años.

Para dar una idea de esta gran diversidad de aplicaciones de los ultrasonidos, relacionamos a continuación algunas de ellas, ajenas al control de la calidad de los materiales estructurales y a los procesos industriales:

- **Biología:** Pregerminación de semillas y homogeneización de la leche; esterilización en fase líquida o gaseosa.

- Comunicaciones: Señales submarinas y otros sistemas de mensajes.
- Fotografía: Preparación de emulsiones.
- Química: Aceleración de reacciones y floculación.
- Medicina: Diagnóstico: ecografía; Terapéuticas: Preparación de hormonas y antígenos, cirugía y odontología.
- Navegación y Pesca: Ayuda a la navegación en marina y sondas de profundidad: detección de cascos, bajos y bancos de peces.
- Industria Química: Aceleración del envejecimiento en la industria vinícola, preparación de los coloides y desgasificación de líquidos; control de la formación de espumas.
- Ensayos de laboratorio: Efectos estroboscópico, estudios sobre la difracción de la luz, sobre la velocidad acústica y sobre el calor.
- Procesos de colada y solidificación: Afino del grano, aceleración en el solubilizado, emulsionado y formación de nuevas fases, desgasificación.
- Tratamientos térmicos: Aceleración de la difusión, estabilización de los estados alotrópicos.
- Pulvimetalurgia: Obtención de estados metálicos finamente divididos.
- Tratamientos superficiales: Agitación y activación de los baños de electroplaqueado.
- Proceso de limpieza y depuración: Aceleración de la limpieza y floculación del humo.
- Procesos de soldadura: En sustitución de fundente; como fuente de calor en la soldadura de materiales plásticos.
- Mecanizado: Activación del proceso abrasivo y perforación.
- Ensayos y medida de laboratorio: Aceleración de los ensayos de fatiga.
- Control de calidad de los materiales estructurales: Detección de heterogeneidades (Defectología), determinación de sus propiedades (Caracterización) y medida de espesores (Metrología).

Todas estas aplicaciones se pueden agrupar en dos áreas:

- Las que explotan la energía acústica como tal; en estos casos se utilizan elevados niveles de energía.
- Las que explotan la energía acústica solo como potadora de la señal, lo que, en general va asociado a bajos niveles de energía.

El control no destructivo por ultrasonidos de los materiales estructurales se realiza dentro de esta segunda área. Se utilizan haces de ondas acústicas de alta frecuencia (En general entre 1 y 25 MHz) que se propagan a través del material y se reflejan, difractan y atenúan, haciendo posible la detección de heterogeneidades, la medida de espesores o la determinación de ciertas propiedades tecnológicas.

### **Ventajas y desventajas del ensayo por ultrasonido <sup>[17]</sup>:**

Si comparamos con otras técnicas no destructivas, las principales ventajas del ensayo por ultrasonidos son:

- Alto poder de penetración: Se considera un ensayo que, junto con la radiografía, aporta información de todo el volumen de la muestra pero con una capacidad de ensayar espesores muchos mayores. Por ultrasonidos es frecuente trabajar con distancias entre 300 a 500 mm en acero. Sin necesidad de equipo sofisticado, es posible ensayar ejes de hasta 5 y 6 metros de longitud.
- Alta sensibilidad: Permite detectar defectos muy pequeños. No es posible, sin embargo, dar una cifra absoluta de detectabilidad por ultrasonidos ya que depende, entre otros factores, de la calidad metalúrgica del material que se va a ensayar. En efecto, una grieta de 1 mm de longitud y 0,5 mm de profundidad se puede perfectamente detectar en un material de grano fino y con un buen acabado superficial. Sin embargo esa misma grieta no se puede detectar si el material a inspeccionar está en estado bruto de moldeo.
- La posición de los defectos internos: Se determina con precisión. La estimación del tamaño, orientación, forma y naturaleza de la heterogeneidad resulta

igualmente posible. Estas características son el mayor interés cuando se aplican criterios de aceptación basados en la Mecánica de Fracturas.

- Acceso: Solo se necesita acceso por una superficie. Esto permite la inspección de recipientes cerrados o la medida de espesor de tubos.
- Resultado de la inspección: Es instantáneo ya que todo el proceso de generación y recepción de la señal se controla electrónicamente. Esto hace posible la automatización de la exploración y de la presentación de resultados. También es posible la evaluación automática.
- Documentación del ensayo: Las técnicas actuales de captura automática de datos y de presentación de resultados hacen posible la adecuada documentación del ensayo. Además los datos se almacenan en un soporte magnético, muy barato, fácil de mantener, lo que hace posible la reproducción del ensayo desde lejos del lugar donde se realizó.
- Riesgos: Sin riesgos para el operador o para las personas que puedan estar cerca de la zona de ensayo.
- Movilidad de los equipos: La elevada portabilidad de los equipos (Los que se usan para medir espesores son de bolsillo y pueden llegar a pesar menos de 500 gramos).
- Procesamiento de data: La información obtenida en el ensayo en general amplitud de señal y tiempo, puede ser fácilmente procesada por técnicas digitales para caracterizar defectos o para determinar propiedades del material.
- Versatilidad: El ensayo por ultrasonido dispone de gran cantidad de recursos técnicos que permiten acometer una variedad enorme de problemas industriales.

Dentro de las desventajas del ensayo por ultrasonidos se puede citar:

- Talento humano: Los ensayos manuales requieren personal altamente cualificado. La gran cantidad de decisiones críticas que tiene que tomar el operador en el ensayo manual, unido a la ausencia de una adecuada

documentación de los resultados, reduce la fiabilidad de estos ensayos y ha sido causa de un cierto retraso en la aplicación masiva de los ensayos por ultrasonidos. Al mismo tiempo, este problema ha impulsado el desarrollo de técnicas automáticas de inspección en las que la influencia de las decisiones del operador se reduce mucho.

- Los procedimientos de inspección: El diseño y puesta a punto de los procedimientos de inspección requiere amplios conocimientos técnicos.
- Dificultad de inspección en muestras: Las muestras pequeñas irregulares, rugosas o de pequeño espesor son difíciles de inspeccionar.
- Detección: Las heterogeneidades muy próximas a la superficie pueden no ser detectables.
- Medio de acoplamiento: El paso de energía acústica desde el palpador hacia la muestra y el retorno al palpador requiere el uso de un medio acoplamiento líquido o semilíquido.
- Calibración: La calibración del sistema de ensayo y determinación de ciertas características de los defectos requiere el uso de muestras patrón o de referencia.

### **2.7.1. Naturaleza y propiedades de las ondas ultrasónicas <sup>[17]</sup>**

Las ondas ultrasónicas son ondas de idéntica naturaleza (mecánica o elásticas) que las ondas sónicas y se diferencian de ellas en que operan a una frecuencia por encima de la audible. En la figura 2.1 se representa el espectro acústico en el que cabe distinguir las tres bandas siguientes:

**Infrasónicas:** Se extiende por debajo de 20 Hz. No tiene aplicaciones en control de materiales estructurales.

**Sónica:** Es el intervalo de frecuencias en que el oído es capaz de percibir sonido. Varía de unas personas a otras pero, en general, se considera que abarca desde 20

KHz para los más agudos. La capacidad de percibir un sonido no depende de sólo de la frecuencia sino también de la intensidad o presión acústica. De ahí la limitación por abajo, cuando es insuficiente para excitar el tímpano y por arriba cuando la elevada presión llega a producir daños irreparables en el aparato auditivo.

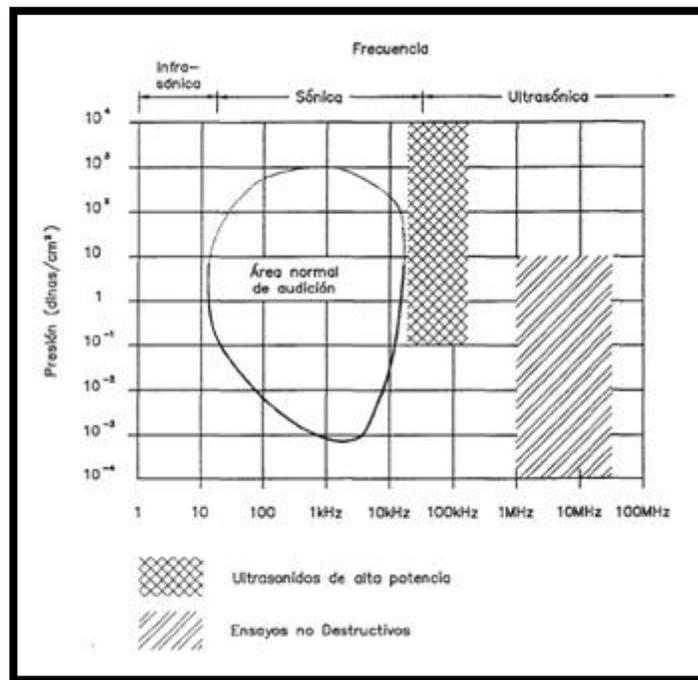


Figura 2.1. Espectro acústico. <sup>[17]</sup>

Ultrasónica: cuando la frecuencia es superior a 20 KHz. Dentro de esta banda se pueden diferenciar, a su vez, tres zonas diferentes:

- Ultrasonido próximo, con frecuencia entre 20 y 100 KHz., que es la zona en que operan las técnicas que utilizan elevados niveles de energía. Los sistemas de limpieza, agitación y, en general, cavitación trabajan en esta banda.
- La banda utilizada en control de calidad de los materiales, que se extiende entre 0,2 y 25 MHz, aunque la gran mayoría de los ensayos se hacen entre 2 y 5 MHz.

- Las frecuencias por encima de 100 MHz se consideran dentro del campo de la microscopía acústica, técnica en la que se llegan a aplicar frecuencias de hasta 1 GHz que no todos los medios son aptos para transmitir ultrasonidos.

En muchos aspectos, un haz de ultrasonidos se comporta de manera muy semejante a uno luminoso; ambos son ondas (electromagnética: la luz; elástica: la onda acústica) y obedecen a las ecuaciones de movimientos ondulatorios. Igual que la luz, un haz de ultrasonidos se refleja en las interfaces, se refracta cuando cruza un límite entre dos medios de diferentes características y se difracta en los bordes agudos o alrededor de los obstáculos. También se dispersa y se atenúa en forma parecida a la luz. Sin embargo, hay diferencias considerables, como las relacionadas con los modos de onda, mucho más frecuentes, fáciles de producir en ultrasonidos y con un comportamiento bastante complejo.

En principio, las ondas ultrasónicas pueden propagarse a través de cualquier medio material, es decir, donde haya átomos o moléculas capaces de vibrar. Dichas ondas son atenuadas por todos los materiales según los diferentes fenómenos de absorción y dispersión que en algunos casos son muy fuertes, por lo que no todos los medios son aptos para transmitir ultrasonidos.

Buena parte de las propiedades de las ondas acústicas no dependen de la frecuencia, por lo que son comunes tanto a las ondas sónicas como a las ultrasónicas. En aquellos casos donde se manifiesten su influencia se harán las observaciones del caso.

### **2.7.2. Propagación de las ondas ultrasónicas en diversos medios** <sup>[17]</sup>

Existen muchos fenómenos en los que se puede estudiar el comportamiento de una oscilación elástica, tales como:

- El movimiento de la superficie del agua en un estanque después de lanzar una piedra.
- La oscilación de una cuerda al sacudir un extremo.
- El péndulo de resorte el cual tiene un movimiento sinusoidal.
- El movimiento de un péndulo convencional el cual es sinusoidal.

### 2.7.3. Parámetros <sup>[6] [17] [18]</sup>

- Frecuencia ( $f$ ): es el número de oscilaciones de una partícula dada por segundo. Dentro de una misma onda, es la misma para todas las partículas y es idéntica a la frecuencia del generador, la cual se puede elegir arbitrariamente.
- Longitud de onda ( $\lambda$ ): es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. Es inversamente proporcional a la frecuencia.
- Velocidad acústica ( $c$ ): es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada; Esta velocidad es una característica del material y, en general, es constante para un material dado, para cualquier longitud de onda. Sin embargo no es rigurosamente exacto pues dicha velocidad depende especialmente de los líquidos y gases, de la presión, de la temperatura y otros parámetros.
- Amplitud de oscilación ( $A$ ): es el desplazamiento máximo de una partícula de su posición cero.
- Velocidad instantánea de vibración ( $v$ ): Es la propia de la partícula en su movimiento oscilatorio. Cuando se refiere a su amplitud o valor máximo se designa  $V$ .
- Presión acústica ( $P$ ): En los puntos de gran densidad de partículas, la presión es también mayor que la presión normal mientras que en las zonas dilatadas es menor.

#### 2.7.4. Ondas mecánicas <sup>[17]</sup>

Dentro de los diferentes tipos de ondas que aparecen en la naturaleza, se denominan ondas mecánicas a aquellas que se desplazan a través de un medio deformable o elástico, a diferencia de aquellas que no requieren de ningún medio para su propagación. Formalmente se puede definir a las ondas mecánicas como aquellas que viajan de un lugar a otro.

Otro aspecto que caracteriza a las ondas mecánicas, es el hecho de que todo movimiento ondulatorio tiene una energía asociada a él. Con relación a esto sólo se han visto diferentes formas de energía, que se transporta de un lugar a otro debido al movimiento de los cuerpos o de las partículas (como en las diferentes formas de energía mecánica), pero en el caso de las ondas ocurre un fenómeno físico en el cual se presenta un fenómeno de transporte de energía sin que las partículas o cuerpos materiales se desplacen.

Las ondas mecánicas pueden clasificarse de diferentes maneras. Inicialmente se hará considerando la dirección del movimiento de las partículas de la materia, con respecto a la dirección de propagación de onda.

La radiación abarca las ondas electromagnéticas (tales como la luz, ondas de radio, rayos X, etc.), ultrasonido y partículas (tales como partículas alfa, partículas beta, etc.) emitidas por materiales radioactivos mientras decaen.

Puede ser clasificada en no ionizante e ionizante. En general, la energía de la radiación no ionizante (tal como la luz y las ondas de radio) es baja y no suficiente para cambiar las propiedades químicas de la sustancia. Por otra parte, la radiación ionizante (tal como lo son las partículas alfa y beta) tiene suficiente energía para remover electrones desde un átomo para crear iones cargadas eléctricamente. Este proceso de ionización frecuentemente resulta en cambios en los tejidos vivos, lo que puede conducir a daños en el organismo.

La radiación no puede ser escuchada, olida o saboreada y la mayoría de ella no puede ser sentida.

#### 2.7.4.1. Tipos de onda <sup>[17]</sup> <sup>[39]</sup>

Onda longitudinal: Las ondas longitudinales son ondas que transfieren energía en la misma dirección que la perturbación en el medio de propagación. Pueden consistir en pulsos simples o múltiples. Todas las ondas longitudinales consisten en regiones de alta y baja densidad conocidas como condensaciones y dilataciones que oscilan alrededor de los puestos locales de forma paralela al equilibrio de la ruta de la energía a transferir. Las ondas sonoras son longitudinales, se propagan a través del aire, constan de una serie de fluctuaciones de presión superior y atmosférica por debajo de la presión.

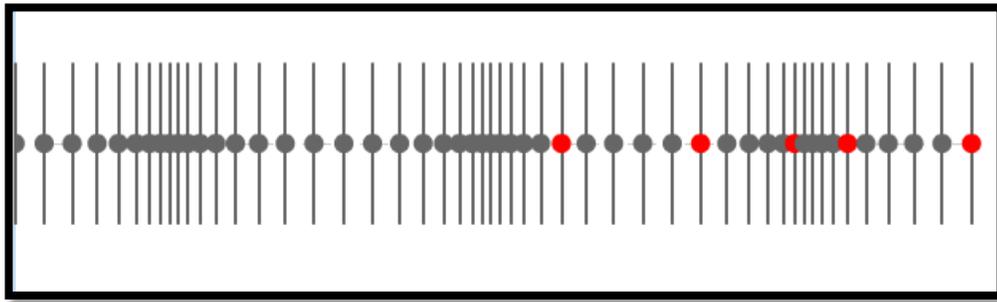


Figura 2.2. Onda longitudinal. <sup>[39]</sup>

Ondas transversales: Una onda transversal puede consistir en más de un pulso. Las ondas transversales consisten en el resultado de muchos pulsos cuando el origen de la onda oscila cerca de la posición de equilibrio durante largos períodos de tiempo. Bajo tales condiciones iniciales el pulso es seguido inmediatamente por otro pulso de desplazamientos contrarios. A una serie de tales pulsos alternantes se le conoce como un tren de ondas.

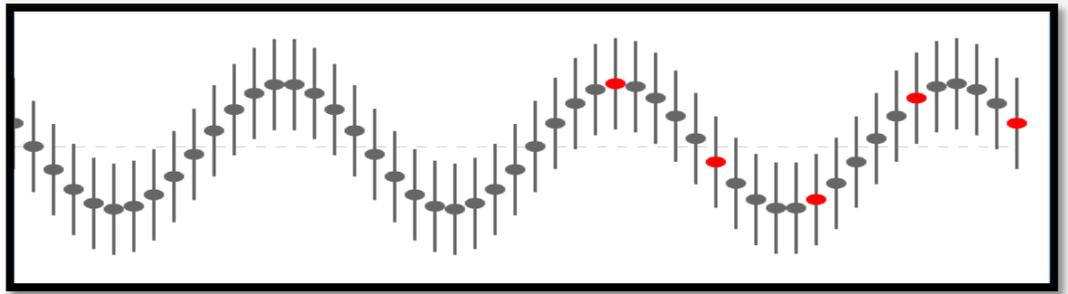


Figura 2.3. Onda transversal. <sup>[39]</sup>

Onda de superficie: La onda de superficie o de Rayleigh se propaga solamente en la periferia plana o curva de un sólido semifinito, siguiendo las irregularidades de la superficie o contorno del mismo. Se puede considerar como un tipo especial de onda transversal.

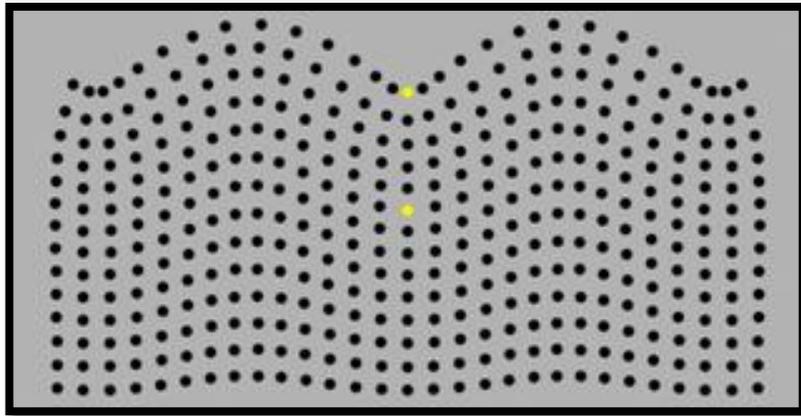


Figura 2.4. Onda de superficie. <sup>[40]</sup>

Onda de Lamb: Si el sólido semifinito se reduce en espesor, se obtiene una chapa en la que la onda puramente de superficie ya no puede existir como tal, a no ser que su longitud de onda sea considerablemente menor que el espesor de la chapa. Cuando el espesor es del mismo orden que la longitud de onda se producen varios tipos de ondas de chapa.

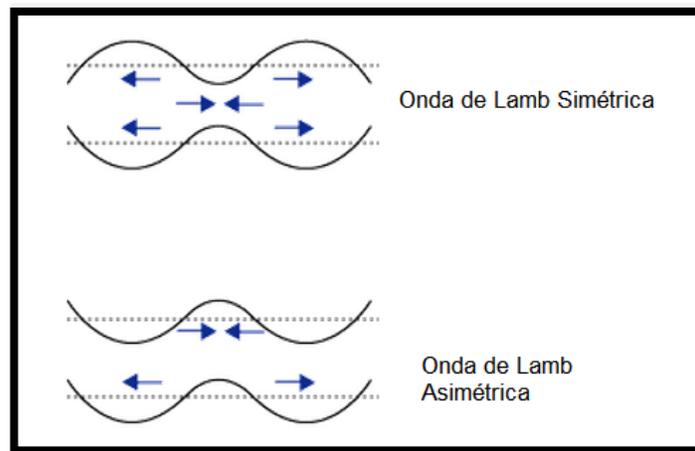


Figura 2.5. Onda de Lamb. <sup>[39]</sup>

### 2.7.5. Formas de ondas <sup>[13] [17]</sup>

Los diferentes tipos de ondas descritos anteriormente se pueden presentar según formas diferentes de onda:

Medios ilimitados: Hasta el presente se considera que en estos medios se propagaban ondas planas, es decir, ondas en las que una fase dada de oscilación es siempre la misma en un plano dado. Este plano es la superficie de onda que, durante la propagación, se mueve paralela a sí misma.

La superficie de la onda no es necesariamente plana, sino que, al contrario, nunca es estrictamente plana en el caso de un generador, sino de curvatura compleja.

Para una representación más clara y para simplificar cálculos, es preferible sustituir la forma de las ondas en los materiales por formas simplificadas, tales como ondas planas, esféricas o cilíndricas.

En una superficie de onda dada, por ejemplo en una esfera en el caso de una onda esférica, sólo la fase es idéntica, pero no necesariamente la amplitud o la presión acústica; de tal manera que se puede tener un valor apreciable de estas magnitudes

dentro de un determinado sector angular alrededor de una dirección dada, mientras que puede ser nulo en otras direcciones.

Medios limitados: Se ha supuesto, en el caso de los modos de onda longitudinal y transversal descritos anteriormente, que estas ondas se propagan en un medio ilimitado. En los cuerpos finitos, tales como chapas y barras, la propagación se altera por fenómenos de refracción o de reflexión. Además en el caso de la reflexión de ondas longitudinales, estas se pueden transformar en ondas transversales y viceversa, la superficie puede sufrir transformaciones, tal como ocurre con las ondas de superficie y las ondas de Lamb. Debido a estos efectos, resulta complicado tratar de explicar la forma de propagación de la onda aún en cuerpos de forma simple.

Las formas de onda en los medios limitados, tales como las ondas de superficie y de Lamb, al igual que las ondas planas o esféricas en los medios limitados, representan sólo unas formas simplificadas del fenómeno natural de propagación de los ultrasonidos. En la práctica sólo se obtienen ondas planas con bastante aproximación, en la vecindad de generadores grandes y planos; pero a distancias mayores y en el caso de generadores pequeños, la propagación de los ultrasonidos en chapas difiere considerablemente de la imagen ideal de la onda de Lamb.

Existe otro tipo de onda llamado “creeping waves” que, aunque restringido a ciertos casos particulares ha encontrado la aplicación en el ensayo de materiales. Son ondas de compresión que se transmiten por la superficie, pero, al contrario que las ondas de Rayleigh, no se ven afectadas por gotas de agua o rugosidades superficiales. Sin embargo, pierden rápidamente energía por transformación continua en ondas transversales que son irradiadas desde la superficie con un ángulo del orden de 33 grados. Por tanto, el intervalo de distancia es que se pueden utilizar estas ondas pequeño, rara vez a 50 mm. Se aplican a problemas de detección de grietas próximas a la superficie.

## 2.10. Reflexión <sup>[18]</sup>

### 2.10.1. Aproximación de un rayo en óptica geométrica.

El campo de la óptica geométrica abarca el estudio de la propagación de la luz, a partir del supuesto de que la luz se desplaza en una dirección fija y en línea recta cuando pasa por un medio uniforme y cambia su dirección en el momento en que se encuentra con la superficie de un medio diferente o si las propiedades ópticas del medio nos son uniformes ya sea en espacio o tiempo. Para el estudio de la óptica geométrica se utiliza la aproximación de un rayo; para entender esta aproximación, se observa que los rayos de una onda determinada son líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda, como se ilustra en la figura 2.6 para una onda plana. En la aproximación de un rayo, una onda que se mueve en un medio se desplaza en línea recta en la dirección de sus rayos.

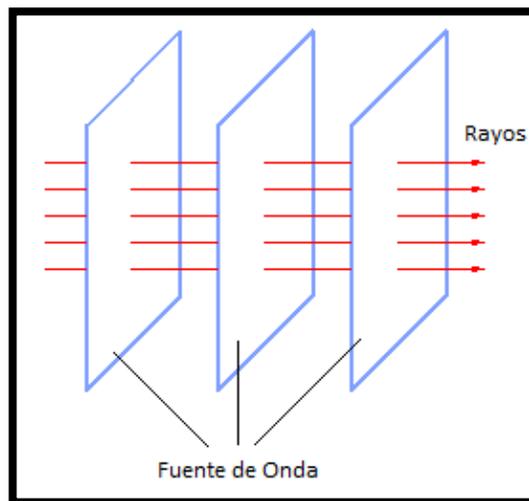


Figura 2.6. Onda plana que se propaga a la derecha. <sup>[18]</sup>

Si la onda se encuentra con una barrera en la que hay abertura circular cuyo diámetro es mucho mayor que la longitud de onda, como se ve en la figura 2.7a, la onda que emerge de la abertura continúa moviéndose en línea recta (Además de algunos

pequeños efectos de borde); por tanto, la aproximación de rayo es válida. Si el diámetro de la abertura es del orden de longitud de onda, como en la figura 2.7b, las ondas se extienden desde la abertura en todas direcciones, este efecto se llama Difracción. Por último, si la abertura es mucho menor, que la longitud de onda, la abertura se aproxima como una fuente puntual de ondas, como se muestra en la figura 2.7c.

Efectos similares se observan cuando las ondas se encuentran con un objeto opaco de dimensión  $d$ . En este caso, cuando  $\lambda \ll d$ , el cuerpo arroja una sombra nítida.

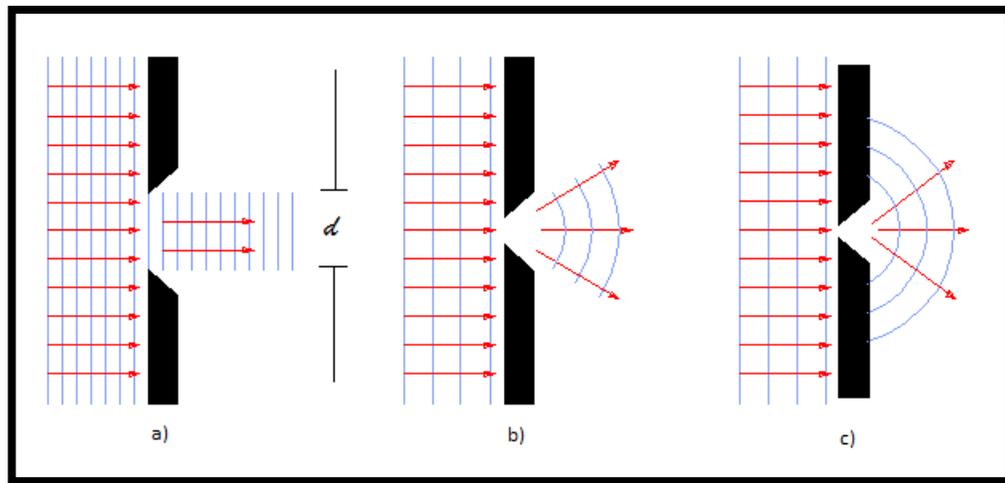


Figura 2.7. Una onda plana con longitud  $\lambda$  incide sobre una barrera en la que hay una abertura de diámetro  $d$ . a) Cuando  $\lambda \ll d$ , los rayos siguen en una trayectoria de línea recta. b) Cuando  $\lambda \approx d$ , los rayos se extienden después de pasar la abertura. c) Cuando  $\lambda \gg d$ , la abertura se comporta como fuente puntual que emite ondas esféricas.<sup>[18]</sup>

### 2.10.2. La onda bajo reflexión

Como con las ondas sobre cuerdas, cuando un rayo de luz que se desplaza en un medio encuentra una frontera con otro medio, parte de la luz incidente se refleja: para ondas sobre una cuerda unidimensional, la onda reflejada necesariamente debe restringirse a una dirección a lo largo de una cuerda; para ondas de luz que viajan en

el espacio tridimensional, no se aplica tales restricciones y las ondas de luz reflejadas pueden estar en direcciones distintas de la dirección de las ondas incidentes. La figura 2.8a muestra varios rayos de un haz de luz incidente en una superficie reflectora lisa, semejante a espejo. Los rayos reflejados son paralelos entre si, como se indica en la figura. La dirección de un rayo reflejado está en el plano perpendicular a la superficie reflectora que contiene al rayo incidente. La reflexión de luz desde esta superficie lisa se denomina reflexión especular. Si la superficie reflectora es rugosa, como se ve en la figura 2.8 b, la superficie refleja los rayos no como un conjunto paralelo sino en varias direcciones. La reflexión desde cualquier superficie rugosa se conoce como reflexión difusa. Una superficie se comporta como superficie lisa mientras las variaciones de superficie son mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente.

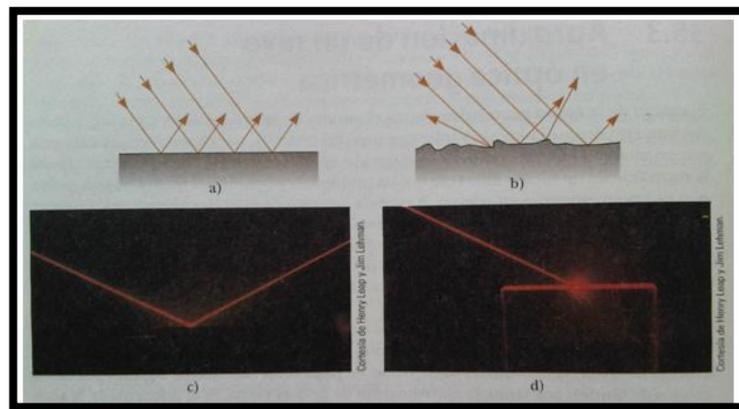


Figura 2.8. Representación esquemática de a) reflexión especular, donde todos los rayos reflejados son paralelos entre si y b) reflexión difusa, donde los rayos reflejados viajan en direcciones aleatorias, fotografías de reflexión especular y difusa con luz láser. <sup>[18]</sup>

La diferencia entre estas dos clases de reflexión explica porque le es más difícil ver cuando circula en auto durante una noche lluviosa. Si el pavimento esta mojado, la superficie lisa del agua refleja en forma especular casi toda la luz de los faros del auto y los aleja de éste (quizá hacia los ojos de conductores que circulan en sentido contrario). Cuando el pavimento está seco, su superficie rugosa refleja en forma

difusa parte de los rayos de luz de los faros, hacia el conductor, lo cual permite ver con más claridad la carretera. En este libro sólo se analiza la reflexión especular.

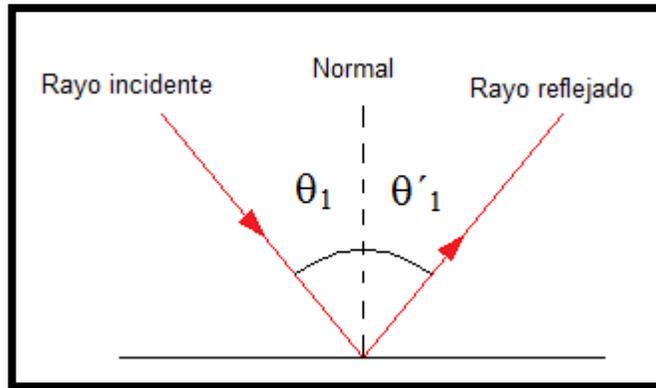


Figura 2.9. Onda de reflexión. <sup>[18]</sup>

Considere un rayo de luz que viaja en el aire y que incide a un ángulo en una superficie plana y lisa, como se ve en la figura 2.9. Los rayos incidente y reflejado forman ángulos  $\theta_1$  y  $\theta'_1$ , respectivamente, donde los ángulos se observan entre la normal y los rayos. (La normal es una línea con trazo perpendicular a la superficie). Experimentos y teorías muestran que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia:

$$\theta'_1 = \theta_1 \quad (1)$$

La correspondencia se denomina Ley de Reflexión. Porque la reflexión de ondas desde una interfaz entre dos medios es un fenómeno común, se identifica un modelo de análisis para esta situación: la onda bajo reflexión. La ecuación 1 es la representación matemática de este modelo.

### **2.11. Tiempo de vuelo de difracción.** <sup>[19] [20] [21]</sup>

El tiempo de vuelo de difracción es una tecnología reciente de imágenes ultrasónicas con aplicación fundamental en la inspección de soldaduras y aunque puede ser empleado en el material base, el gran impacto se encuentra en el área de la soldadura. Su desarrollo es consecuencia de la necesidad de determinar y registrar el tamaño real de una falla. A diferencia de la técnica Pulso-Eco tradicional, que emplea la atenuación de la señal reflejada para obtener un tamaño aproximado, el tiempo de vuelo de difracción usa las diferencias de las señales difractadas sobre la base de tiempo para poder evaluar mejor el tamaño de un defecto.

#### **2.11.1. Configuración básica de un sistema de tiempo de vuelo de difracción**

La Figura 2.10 muestra el punto de partida de esta técnica. Se plantea como una primera opción el empleo de dos transductores en forma de “tandem”, colocados a ambos lados de la soldadura. Por tanto es una tecnología que emplea *dos transductores de ángulo* trabajando en transmisión-recepción. Esta es una primera característica de esta técnica, en su uso más generalizado. Lo segundo a señalar es que las señales se reciben en forma de *radio frecuencia o RF*.

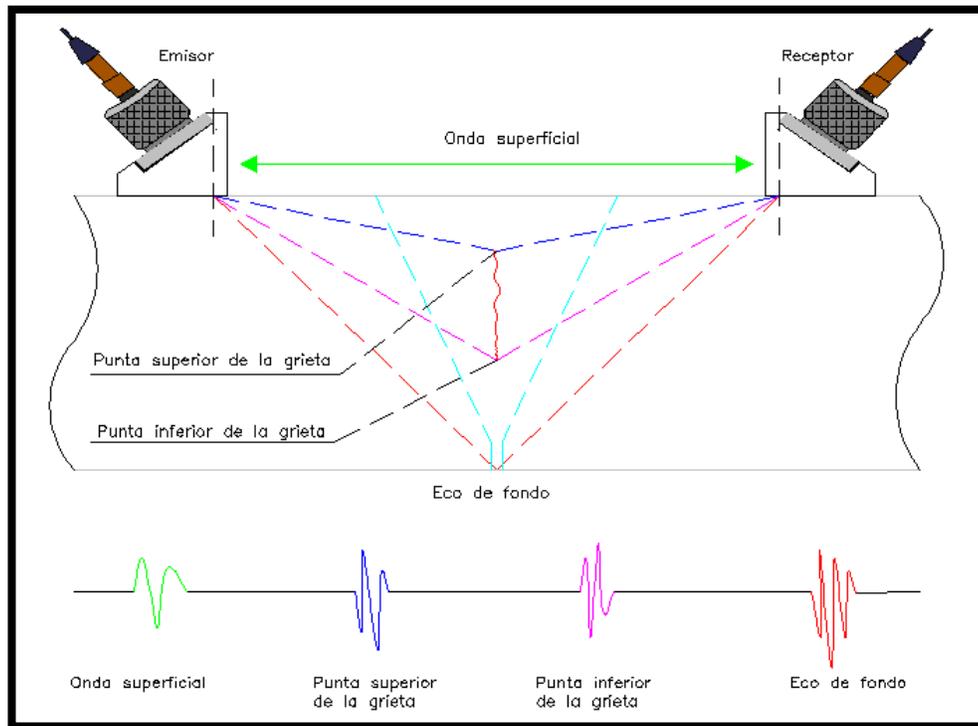


Figura 2.10. Configuración tiempo de vuelo de difracción.

La Figura 2.10 muestra además la formación de dos tipos de ondas llamadas lateral (L) y reflejada (R) respectivamente

Hasta el momento se ha considerado el concepto de ondas asociado al fenómeno ultrasónico, sin atender a su forma temporal ni espacial. En realidad los ensayos no destructivos ultrasónicos utilizan *ondas pulsadas*. Esto marca una diferencia física importante, ya que un pulso tiene una parte delantera o cabeza del mismo que tiene una propiedad muy interesante y es que puede propagarse por la superficie en forma longitudinal. Algunos autores nombran este tipo de fenómeno como ondas reptantes o “creeping waves”, aunque los que trabajan el tiempo de vuelo de difracción prefieren este término para las ondas que contornean los defectos. <sup>[20]</sup>

Por último en la Figura 2.10 se puede observar un detalle importante y es la formación al unísono de las ondas lateral y reflejada. Para que esto sea posible los

patrones de radiación del emisor y del receptor deberán ser lo más abiertos posibles, es decir que cubran desde la superficie hasta el fondo de la pieza. Esta es una característica que deben tener los transductores de tiempo de vuelo, para lo cual el elemento piezoeléctrico tendrá que acercarse al caso de un emisor puntual. Por tanto se establece un compromiso entre sensibilidad y el espesor del material. En caso de piezas con espesor mayor de 75 mm esta condición es difícil de lograr, lo cual puede resolverse con el uso de dos pares de transductores; un par enfocado hacia la superficie y el otro par enfocado hacia la reflexión en el interior de la pieza.

### **2.11.2. Despliegue de una imagen de tiempo de vuelo de difracción** <sup>[22]</sup> <sup>[23]</sup>

La Figura 2.11 muestra el barrido mecánico necesario para obtener una imagen tipo de tiempo de vuelo. Ambos transductores se desplazan a cada lado del cordón de soldadura. Por cada posición del tandem (las normas exigen una resolución mínima de un A-scan por mm.) se envía al ordenador portátil una señal como la mostrada a la derecha de la Figura 2.10 y que se denomina traza. La misma deberá ser muestreada entre 4 a 5 muestras por ciclos de la misma, con la correspondiente generación de grandes ficheros en memoria.

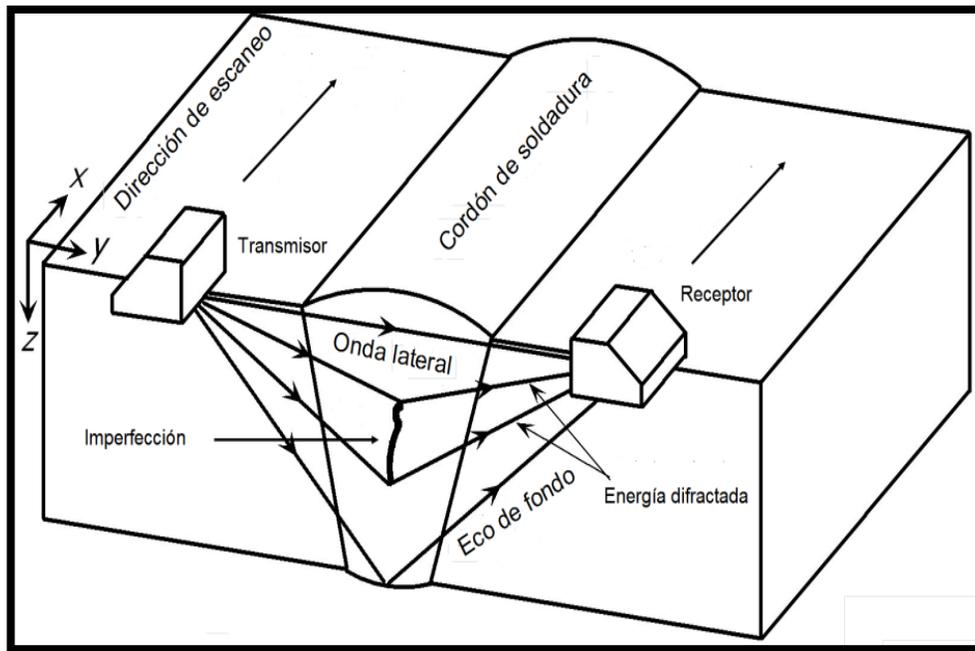


Figura 2.11. Forma de barrido. La flecha indica la dirección de la misma a lo largo del cordón de soldadura.

La traza formará una línea de la imagen en *escala de grises*, donde la parte superior positiva de la señal corresponderá a la escala de grises que tienden al blanco en su punto superior. <sup>[20]</sup>

La parte inferior o negativa de la señal corresponderá a la señal de grises que tienden al negro. De esta forma al realizarse el barrido se obtienen imágenes similares a la mostrada en la Figura 2.12.

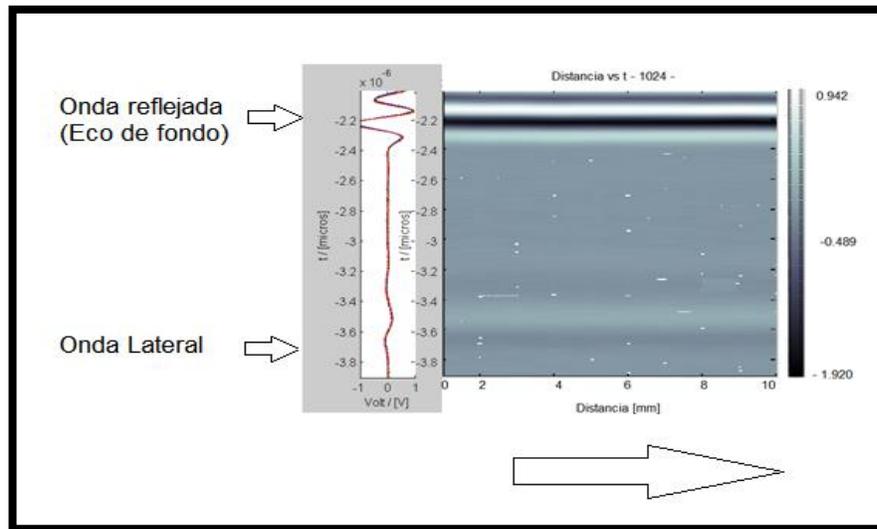


Figura 2.12. A la izquierda se muestra la imagen obtenida por tiempo de vuelo. La flecha representa la dirección del barrido. La línea discontinua a la derecha representa un ejemplo de traza aproximada que se representa a la derecha. La escala horizontal corresponde a la longitud de barrido en milímetros y la vertical cubre desde la superficie superior a la inferior y se registra en unidades de tiempo (seg).

En la Figura 2.12 la imagen de tiempo de vuelo está formada por dos bandas en forma de “cebras” que marcan la parte superior e inferior del cordón. La zona gris entre ambas bandas constituye la zona de inspección dentro de la soldadura. Se observa un detalle importante y es la existencia de *dos zonas muertas*, dadas por el ancho de las “cebras” que restringen la posibilidad de poder examinar fallas en las zonas inferiores y superiores de la zona en la que se realiza la inspección. Esto supone un límite, que puede mejorarse con la obtención de pulsos estrechos, ya sea a través de transductores de banda ancha que den apenas un par de ciclos de excitación ultrasónica o mediante el empleo de alta frecuencia. Para este fin se han desarrollado nuevos materiales piezoeléctricos, destacándose los piezocompuestos por el gran amortiguamiento que presentan.

**2.11.3. Como se ve una indicación con la técnica de tiempo de vuelo de difracción.** <sup>[24][25]</sup>

La esencia de poder ver una indicación por la técnica de tiempo de vuelo es que esta técnica produce bandas en la imagen por la difracción de los extremos de las fallas. La Figura 2.13 muestra este principio, donde debido al fenómeno de difracción una grieta interna nos envía dos señales, una generada por la parte superior de la misma y otra por la parte inferior. De esta forma se tiene una información más precisa del tamaño de la grieta, ya que esta viene determinada por la diferencia de tiempo con que ambas ondas son recibidas en el transductor. En este caso se destaca de nuevo la inversión de fase que se registra en la señal superior de la grieta respecto a la inferior, a la lateral y a la reflejada. Estos pulsos darán lugar a nuevas bandas o “cebras” durante el proceso de barrido, con líneas blancas o negras invertidas entre sí. Las mismas podrán ser rectas, curvadas en los bordes ó simplemente en forma de arcos, en función del tamaño, del largo o de las características puntuales del defecto.

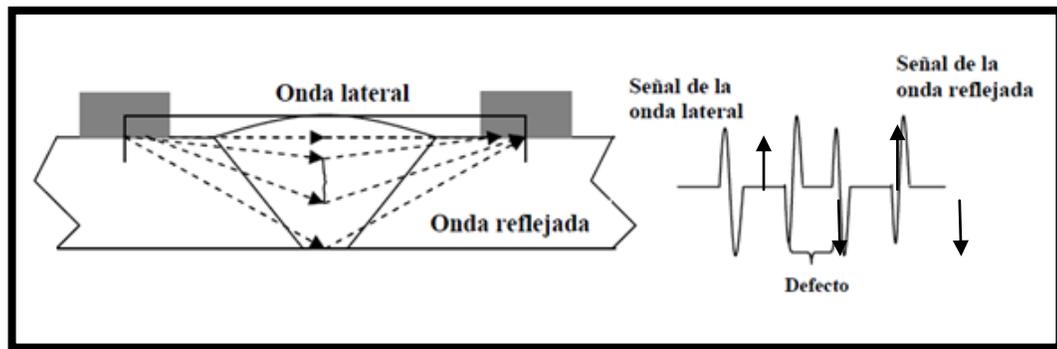


Figura 2.13. Muestra las dos señales que son generadas por la grieta interior del cordón.

Un aspecto que es necesario comentar es el intervalo dinámico de estas señales. A diferencia de la reflexión, la difracción produce señales con una amplitud mucho menor y por eso se necesitan trabajar con un alto nivel de amplificación que puede estar por encima de los 40 dB. En muchos casos, debido a la distancia que separa los transductores y la unidad de control, es necesario el empleo de módulos preamplificadores. En la figura 2.14 se puede observar el preamplificador observado:



Figura 2.14. Preamplificador empleado.<sup>14</sup>

---

## **CAPÍTULO III**

### **Metodología de la Investigación**

En el marco metodológico, se explicará el montaje experimental del procedimiento empleado, el procesamiento de las señales obtenidas y el proceso general para la evaluación de soldaduras con el método de tiempo de vuelo de difracción.

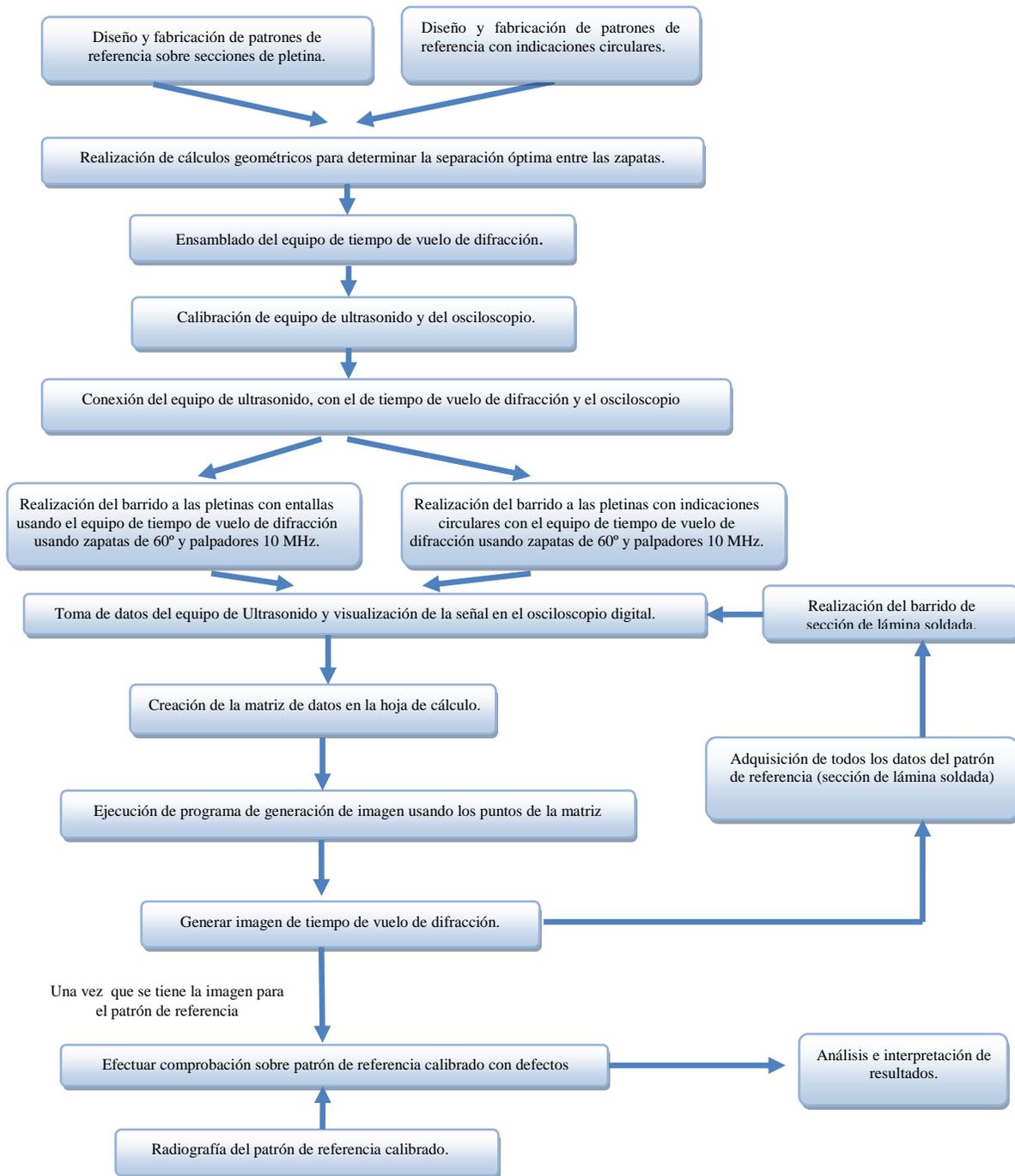


Figura 3.1. Metodología de la investigación

### 3.1. Diseño y fabricación de patrones de referencias sobre secciones de pletina.

Se seleccionó como material para realizar el experimento el acero AISI 1045, se adquirieron pletinas de dicho acero con una superficie rectificada y con una condición superficial libre de pintura y corrosión, que posteriormente se mecanizaron en el número de patrones de referencia deseados, en las dimensiones que se presentan a continuación. Adicional a esto, se les realizó una ranura a cada patrón de referencia con electroerosión por hilo con las profundidades que se indican en la tabla 3.1.

<b>Patrones de referencias con entallas</b>					
	Ancho [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Profundidad de ranura [mm]	Ancho de ranura [mm]
<b>1</b>	38.05	253.00	9.52	1,91	0,40
<b>2</b>	38.05	253.00	9.52	3,81	0,40
<b>3</b>	38.05	253.00	9.52	5,71	0,40
<b>4</b>	38.05	253.00	9.52	7,62	0,40

Tabla 3.1. Dimensiones de las patrones de referencias con entallas.

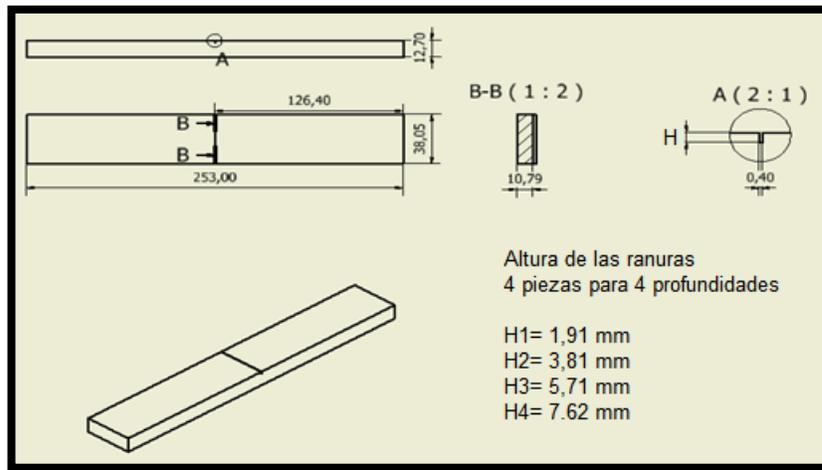


Figura 3.2. Patrones de referencia con entallas.

### 3.2. Diseño y fabricación de patrones de referencias con indicaciones circulares.

Se procedió a elegir como material experimental el acero AISI 1045, se adquirieron pletinas de acero con una superficie rectificada y con una condición superficial libre de pintura y corrosión, que posteriormente se mecanizaron en el número de patrones de referencias deseados y se les realizó un orificio mediante el uso de una fresa de 2 mm de diámetro a las alturas que se muestran en la tabla 3.2.

Patrones de referencias con indicaciones circulares						
	Ancho [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Diámetro de orificio [mm]	Profundidad de orificio [mm]	Altura del orificio [mm]
<b>1</b>	76,20	127,00	12,70	2,00	20,00	3,20
<b>2</b>	76,20	127,00	12,70	2,00	20,00	3,64
<b>3</b>	76,20	127,00	12,70	2,00	20,00	6,40

Tabla 3.2. Dimensiones de los patrones de referencias con indicaciones circulares.

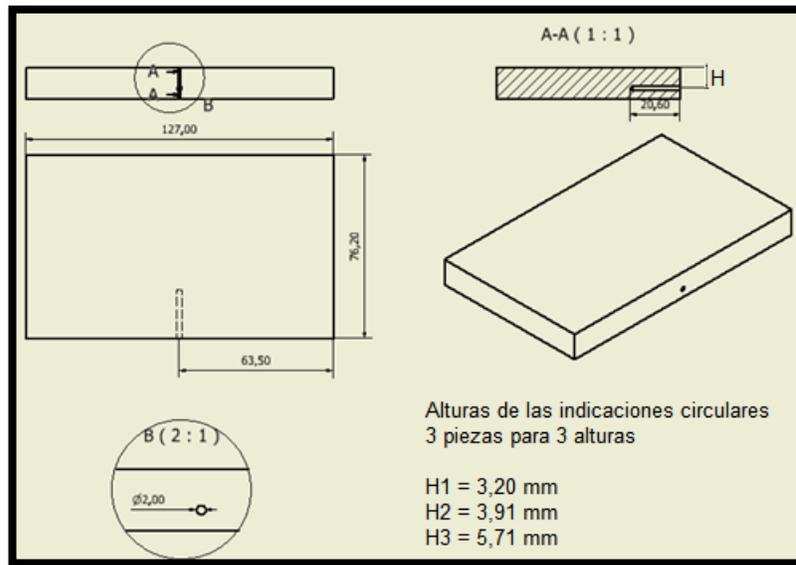


Figura 3.3. Patrones de referencias con indicaciones circulares.

### 3.3. Realización de cálculos geométricos para determinar la separación óptima entre las zapatas piezoeléctricas.

Luego de diseñar y fabricar los patrones de referencias requeridos se procedió a realizar los cálculos geométricos que involucran las distancias de separación de las zapatas para lograr obtener la mejor señal de detección de cada falla

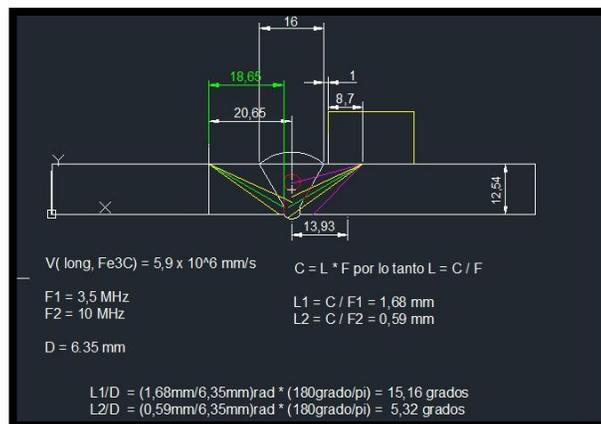


Figura 3.4. Cálculos geométricos.

### 3.4. Ensamblado del equipo de tiempo de vuelo de difracción.

Se realizó el ensamblaje de las zapatas piezoeléctricas con los respectivos palpadores y la armazón rígida. Así como las conexiones respectivas con el amplificador de señal.



Figura 3.5. Componentes del equipo de tiempo de vuelo de difracción. <sup>[41]</sup>

#### 3.4.1 Frecuencia y longitud de onda

Se selecciono una frecuencia de 10 MHz para utilizarse con dos transductores de ondas longitudinales Marca: Olympus Modelo: C544-SM de 6,00 mm de diámetro y dos zapatas Marca: Olympus Modelo: ST2-60L- IHC con ángulo refractado de 60°.



Figura 3.6. Zapatas y palpadores. <sup>[41]</sup>

### 3.5. Calibración de equipo de ultrasonido y osciloscopio.

En el equipo de ultrasonidos se realizó la calibración de la velocidad de la onda longitudinal, teniendo en cuenta el tipo de material, el espesor del material según cada patrón de referencia y el ángulo de disparo de la señal.

En el osciloscopio digital se realizó el centrado de la señal, el ajuste de nitidez y el tiempo de disparo.



Figura 3.7. Equipo de Ultrasonido. Marca Panametrics Modelo Epoch LT [41]



Figura 3.8. Osciloscopio digital. Tektronix® TDS210 [42]

### 3.6. Conexión del equipo de ultrasonido, con el de tiempo de vuelo de difracción y el osciloscopio digital

Se procedió a conectar el equipo de ultrasonido con el amplificador de señal del equipo de tiempo de vuelo de difracción y con el osciloscopio digital, así como los palpadores de emisión y recepción de señal.

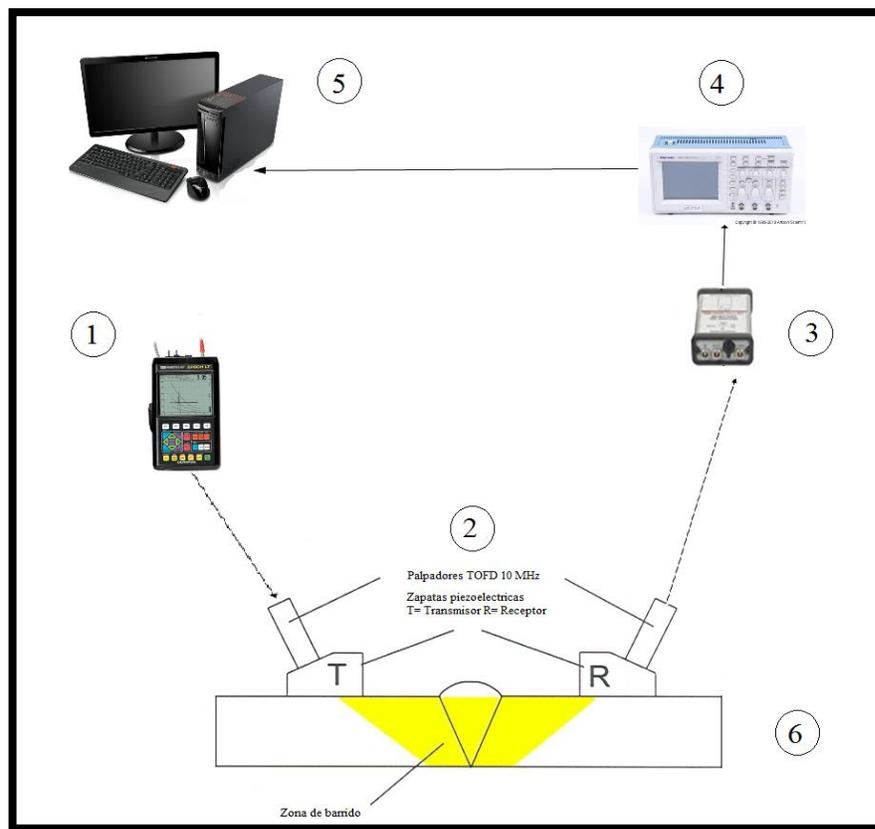


Figura 3.9. Conexión de equipos.

1. Equipo de medidor de fallas, Marca: Panametrics Modelo: Epoch LT
2. Equipo de TOFD: Escáner HST-X04
3. Amplificador de señal

4. Osciloscopio digital Tektronix ® TDS210
5. Computador personal Procesador Dual Core 2.6 GHz 4Gb Ram
6. Patrones de referencias.

**3.7. Realización del barrido a los patrones de referencias con indicaciones de entallas con el equipo de tiempo de vuelo de difracción usando zapatas de 60° y palpadores 10 MHz.**

Se procedió a colocar en cada patrón de referencia el armazón del equipo de tiempo de vuelo de difracción con la distancia de separación previamente calculada para los patrones de referencias y el caso que se deseaba recrear; Se realizó el barrido de toda el patrón de referencia, teniendo una distancia entre mediciones de 1,0 mm, una separación entre las zapatas piezoeléctricas de 3,76 mm y teniendo como medio acoplante gel para ultrasonidos.

La nomenclatura usada para identificar cada patrón de referencia según la tabla:

<b>Código</b>	<b>Descripción del patrón de referencia</b>
H0	Material sano
H1	Con ranura a 1,91 mm de la superficie inferior
H2	Con ranura a 3,81 mm de la superficie inferior.
H3	Con ranura a 5,71 mm de la superficie inferior.
H4	Con una ranura a 7,62 mm de la superficie inferior.
H5	Con una ranura a 1,91 mm de la superficie superior.
H6	Con una ranura a 3,81 mm de la superficie superior.

Tabla 3.3. Nomenclatura de codificación de patrones de referencia.

**3.8. Realización del barrido a los patrones de referencias con indicaciones circulares con el equipo de tiempo de vuelo de difracción usando zapatas de 60° y palpadores 10 MHz.**

Se procedió a colocar en cada patrón de referencia el armazón del equipo de tiempo de vuelo de difracción con la distancia de separación previamente calculada para los patrones de referencias con indicaciones circulares y el caso que se deseaba recrear; Se realizó el barrido de toda el patrón de referencia, teniendo una distancia entre mediciones de 1 mm y se usaron dos distancias de separación entre las zapatas piezoeléctricas: a) 14,95 mm; b) 18,00 mm

Teniendo como medio acoplante gel para ultrasonidos.

La nomenclatura usada para identificar cada patrón de referencia cuando se uso la separación entre zapatas de 14,95 mm:

<b>Código</b>	<b>Descripción del patrón de referencia</b>
O1	Material sano
O2	Con orificio localizado a 3,20 mm de la superficie inferior.
O3	Con orificio localizado a 3,64 mm de la superficie inferior.
O4	Con orificio localizado a 6.40 mm de la superficie inferior.
O5	Con orificio localizado a 8,90 mm de la superficie inferior.

Tabla 3.4. Nomenclatura de codificación de patrones de referencia.

La nomenclatura usada para identificar cada patrón de referencia cuando se uso la separación entre zapatas de 18,00 mm:

<b>Código</b>	<b>Descripción del patrón de referencia</b>
O6	Material sano
O7	Con orificio localizado a 3,20 mm de la superficie inferior.
O8	Con orificio localizado a 3,64 mm de la superficie inferior.
O9	Con orificio localizado a 6.40 mm de la superficie inferior.
O10	Con orificio localizado a 8,90 mm de la superficie inferior.

Tabla 3.5. Nomenclatura de codificación de patrones de referencia.

### **3.9. Toma de datos del equipo de ultrasonido y visualización de la señal en el osciloscopio digital.**

Durante el barrido, en cada medición se realizó la toma de la señal observada en el osciloscopio digital detectada por el equipo de ultrasonido.

La toma de datos se realizo con mediante el uso del equipo de detección de fallas Marca: Panametrics Modelo: Epoch LT, escáner manual Olympus HST-X04, osciloscopio digital Marca: Tektronix® Modelo: TDS220 con apreciación +0,01%, de 1 GS/s de muestreo equivalente, 2500 puntos de longitud de registro y 200 MHz de ancho de banda conectado a un computador personal con procesador AMD Dual Core 2.66 GHz y Memoria RAM: 4 Gb. con los programas instalados Open Choice Desktop ® v, Matlab® 2011a y Microsoft Office Excel ® 2007.

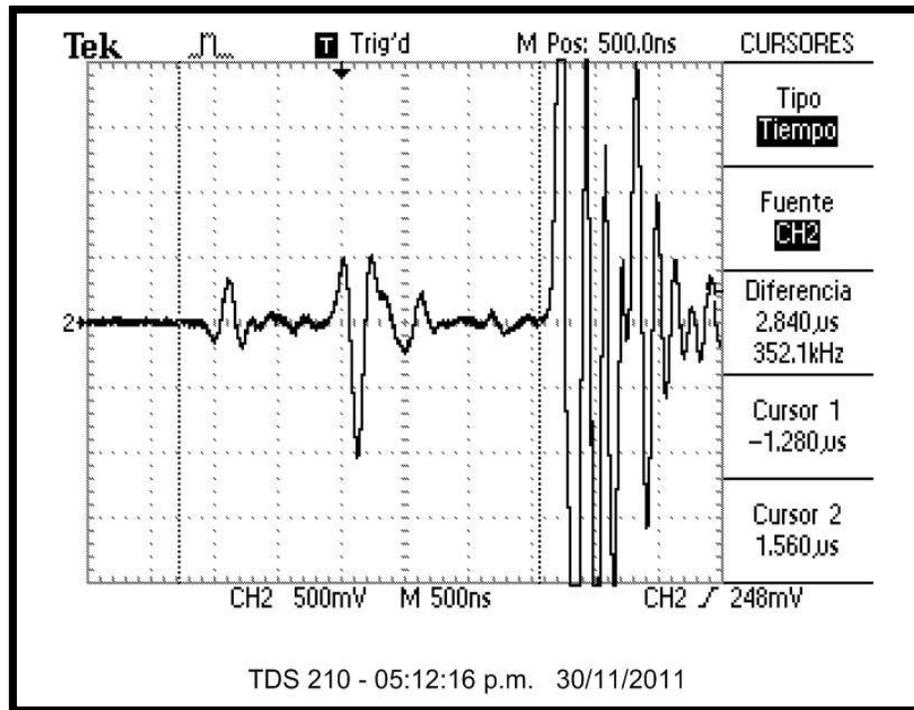


Figura 3.10. Señal visualizada con el osciloscopio digital.

### 3.10. Creación de la matriz de datos en la hoja de cálculo.

Con la data recolectada durante el barrido se realizó la creación de la matriz necesaria para transformar los puntos de la señal visualizada en el osciloscopio en puntos para generar la imagen de barrido completo.

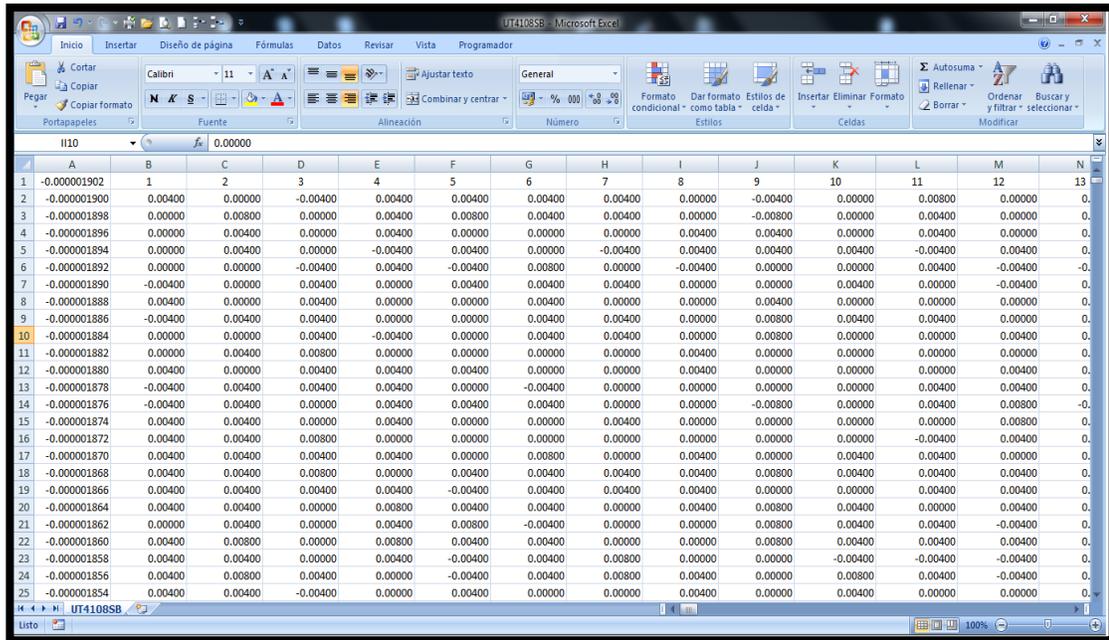


Figura 3.11. Hoja de cálculo contenida con la matriz de datos.

### 3.11. Ejecución de programa de generación de imagen usando los puntos de la matriz

Para procesar la matriz creada con la data recolectada, se procedió a ejecutar un programa en el software MATLAB® para generar las señales de detección de las imágenes de cada barrido realizado.

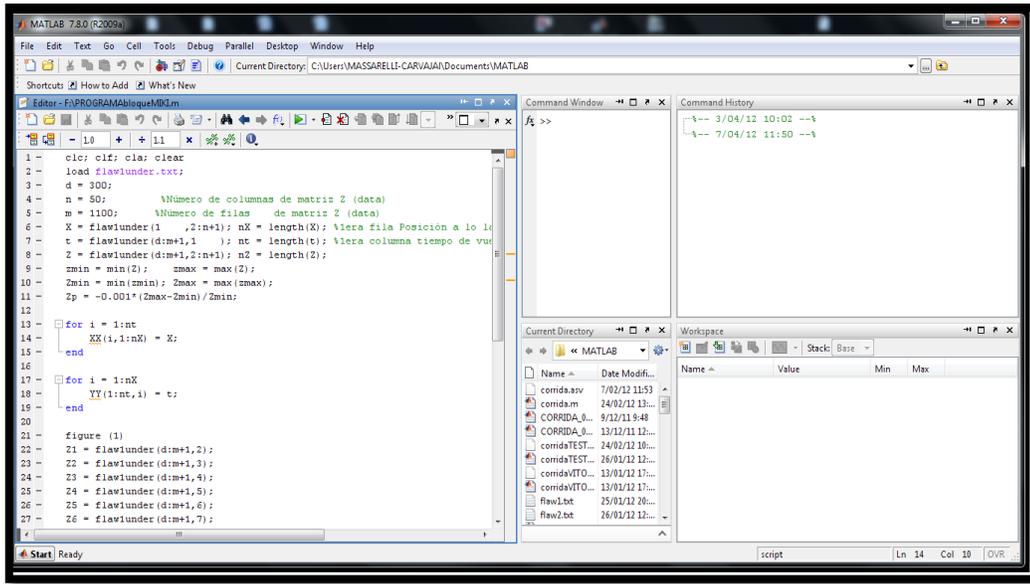


Figura 3.12. Matriz procesada en MATLAB®.

### 3.12. Generar imagen de tiempo de vuelo de difracción.

Luego de procesada la matriz se obtuvo la imagen del barrido la cual será analizada posteriormente.

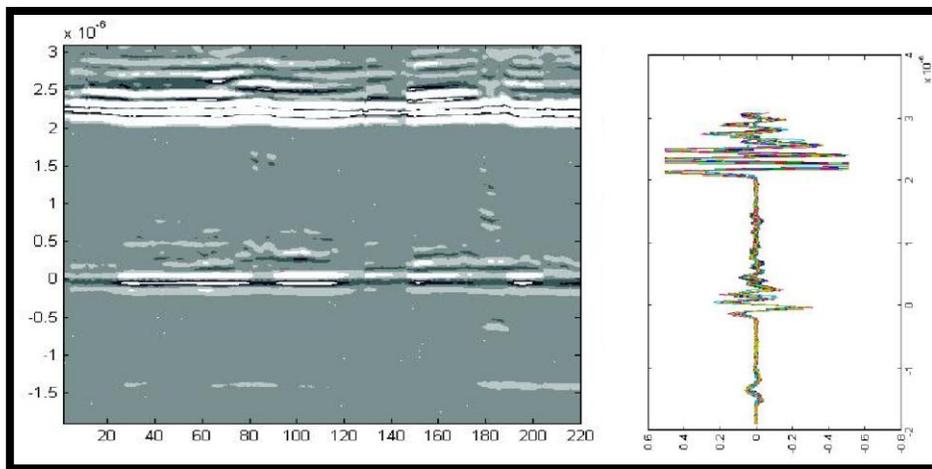


Figura 3.13. Imagen del barrido obtenida con MATLAB®.

**3.13. Adquisición de datos del patrón de referencia calibrado (Sección de lámina soldada).**

Se procedió a elegir como material experimental el acero AISI 1045, se adquirió el patrón de referencia calibrado de dicho acero con una superficie rectificada y con una condición superficial libre de pintura y corrosión, las cuales fueron unidas mediante un cordón de soldadura que contiene las fallas que se especifican en la tabla 3.4. Las dimensiones de la placa de comprobación de encuentran contenidas en la tabla 3.3.:

<b>Sección de lámina soldada</b>		
<b>Ancho [mm]</b>	<b>Largo [mm]</b>	<b>Espesor [mm]</b>
254,00	304,80	12,70

Tabla 3.6. Dimensiones de la sección de lámina soldada.

<b>Imperfecciones de la sección de lámina soldada</b>					
<b>Falla</b>	<b>Tipo de falla</b>	<b>Distancia desde donde comienza la falla según el borde de la superficie de referencia [mm]</b>	<b>Profundidad de la falla [mm]</b>	<b>Longitud de falla [mm]</b>	<b>Altura de falla [mm]</b>
<b>1</b>	Grieta en raíz	41,00	9,00	25,00	6,00
<b>2</b>	Falla de fusión	203,00	8,00	8,00	2,50

Tabla 3.7. Especificaciones de las imperfecciones presentes en la sección de lámina soldada.

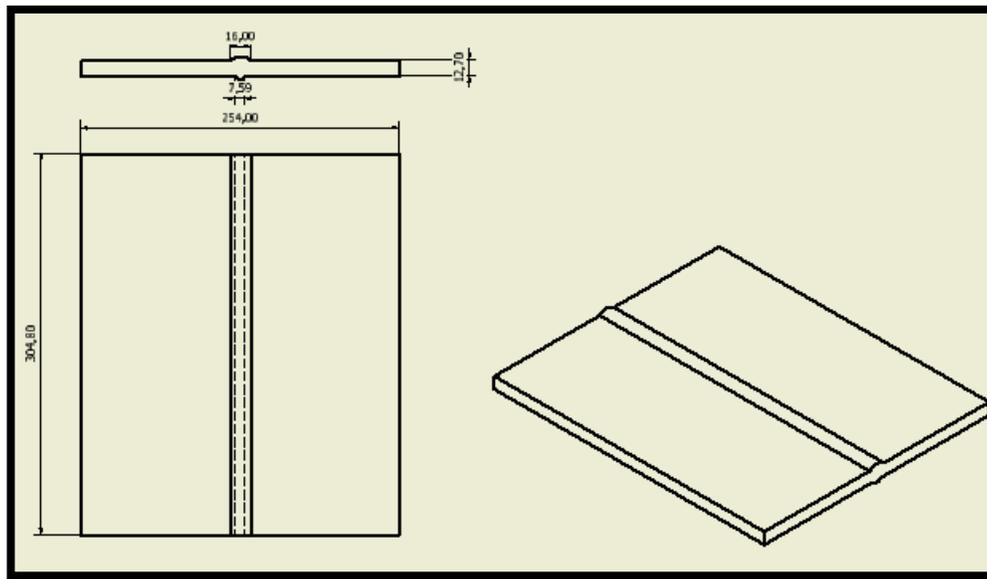


Figura 3.14 Sección de lámina soldada.

### 3.14. Realización del barrido a la sección de lámina soldada.

Se procedió a colocar sobre la placa el armazón del equipo de tiempo de vuelo de difracción con la distancia de separación previamente calculada para dicho patrón de referencia. Se realizó el barrido a lo largo del cordón de soldadura, teniendo una distancia entre mediciones de 1,00 mm. Al igual que con los patrones de referencia anteriores (Los patrones de referencias con entallas y los patrones de referencia con indicaciones circulares) se sigue el mismo procedimiento experimental, es decir, en cada medición se realizó la toma de la señal observada en el osciloscopio digital detectada por el equipo de ultrasonido, con la data recolectada se creó la matriz necesaria para transformar los puntos de la señal visualizada en el osciloscopio en puntos para generar la imagen del barrido completo, dicha matriz se procesa para ejecutar un programa en el software MATLAB® y poder generar las señales de detección de las imágenes del barrido realizado y finalmente se obtiene la imagen del cordón de soldadura de la placa de comprobación que será analizada en la interpretación de los resultados.

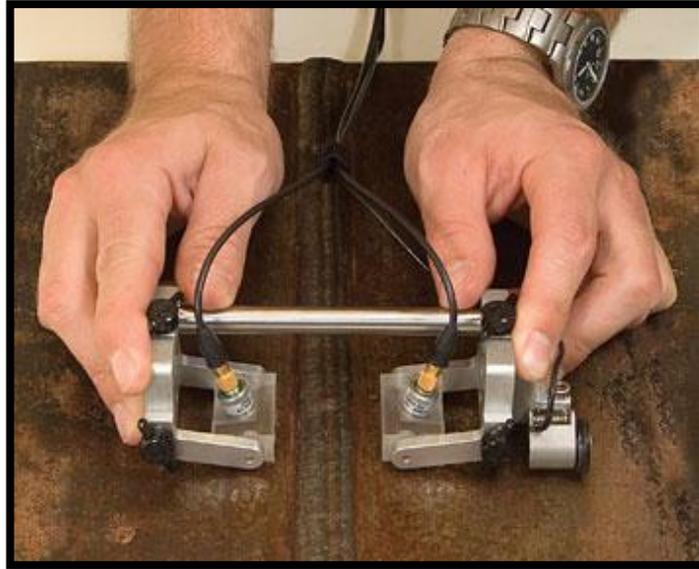


Figura 3.15. Representación de la elaboración del barrido a la sección de lámina soldada. <sup>[41]</sup>

La nomenclatura creada para identificar cada zona de inspección tiene la siguiente estructura:

**P XX FLAW YY**

Donde:

P: Posición

XX: Numero de posición

FLAW: Imperfección

YY: Tipo de imperfección o característica del material.

XX	DESCRIPCIÓN
1	SEPARACION 41.30 mm
2	SEPARACION 27.86 mm
3	SEPARACION 18 mm
YY	DESCRIPCION
0	Material sano sin cordón de soldadura
1	Material con imperfección tipo: grieta de raíz
2	Material sano con cordón de soldadura
3	Material con imperfección tipo: falta de fusión
4	Material sano con cordón de soldadura

Tabla 3.8 Nomenclatura de codificación de mediciones.

### 3.15. Radiografía de la sección de lámina soldada.

Se realizó una radiografía a la placa calibrada a fin de verificar la localización de cada una de las fallas que se encuentran contenidas en la misma, de acuerdo a la información suministrada por el fabricante.

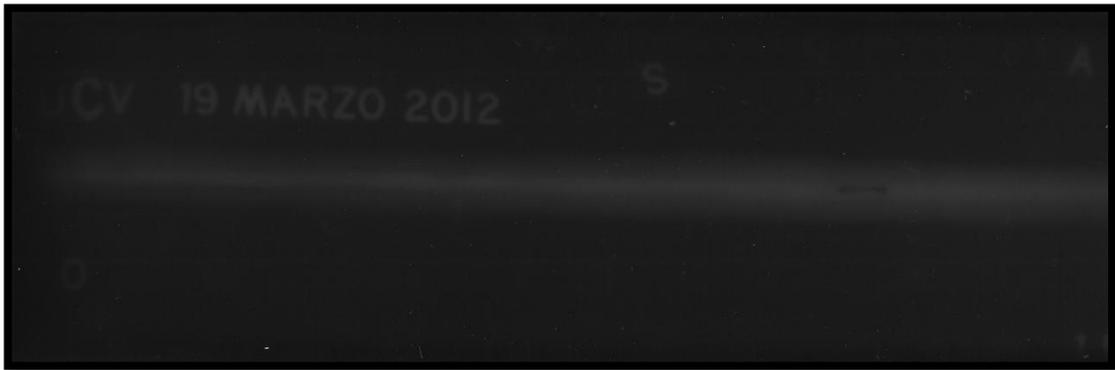


Figura 3.16. Radiografía de patrón de referencia calibrado.

**3.16. Efectuar comprobación sobre sección de lámina soldada con defectos conocidos.**

Una vez que se tiene la imagen del cordón de soldadura del patrón de referencia calibrado obtenida por medio de la técnica de tiempo de vuelo de difracción, se procede a comprobar las fallas detectadas y compararlas con lo que se puede apreciar en la radiografía que se le realizó a dicha placa, con la finalidad de determinar la efectividad del método motivo de estudio del presente trabajo especial de grado.

**3.17. Análisis e interpretación de resultados.**

Luego de haber obtenido las imágenes de las señales de los distintos patrones de referencia estudiados, se realizó el análisis de los resultados obtenidos para comprobar que el uso de un equipo de ultrasonido de campo es perfectamente viable para ser usado en la técnica de tiempo de vuelo de difracción, lo cual se encuentra contenido en el siguiente capítulo.

---

## CAPÍTULO IV

### Resultados y análisis de resultados

Se seleccionó para nuestra evaluación al acero AISI-SAE-1045. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldaduras adecuadas presenta buena soldabilidad. Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria.

Sus propiedades mecánicas se aprecian en la tabla a continuación:

Dureza [HB]	Esfuerzo de fluencia [Mpa]	Esfuerzo máximo [MPa]	Elongación [mm]	Reducción de Área [%]	Modulo de Elasticidad [Gpa]	Maquinabilidad [%]
163	310	565	50	40	200	57

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas ASISI 1045 <sup>[43]</sup>

Sus propiedades físicas:

Densidad	7.87 g/cm <sup>3</sup>
----------	------------------------

Propiedades químicas:

C [%]	Mn [%]	Pmax [%]	Smax [%]
0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,04	0,05

Tabla 4.2. Propiedades químicas. <sup>[43]</sup>

#### 4.1. Patrones de referencias con entallas.

Se inspecciono a partir del método de TOFD, la estructura interna de una serie de patrones de referencias de acero con discontinuidades inducidas que simulan imperfecciones superficiales de cierta profundidad. (Ver Apendice A8.)

Al observar en la Figura 4.1. la señal generada en cada patrón de referencia se observa como la indicación de la imperfección comienza a aparecer a partir del patrón de referencia H1 muy cerca de la señal del eco de fondo y a medida que aumenta el tamaño de la imperfección y disminuye la profundidad con respecto a la cara superior de los patrones de referencia, la indicación se va trasladando hacia la zona de la onda lateral como se aprecia en la señal recogida en el patrón de referencia H4.

Esto se puede apreciar al observar las flechas de color azul en los patrones de referencia H5 y H6 solo observamos la indicación del eco de fondo pues no es capaz de detectar las ranuras que se encuentran en la superficie superior.

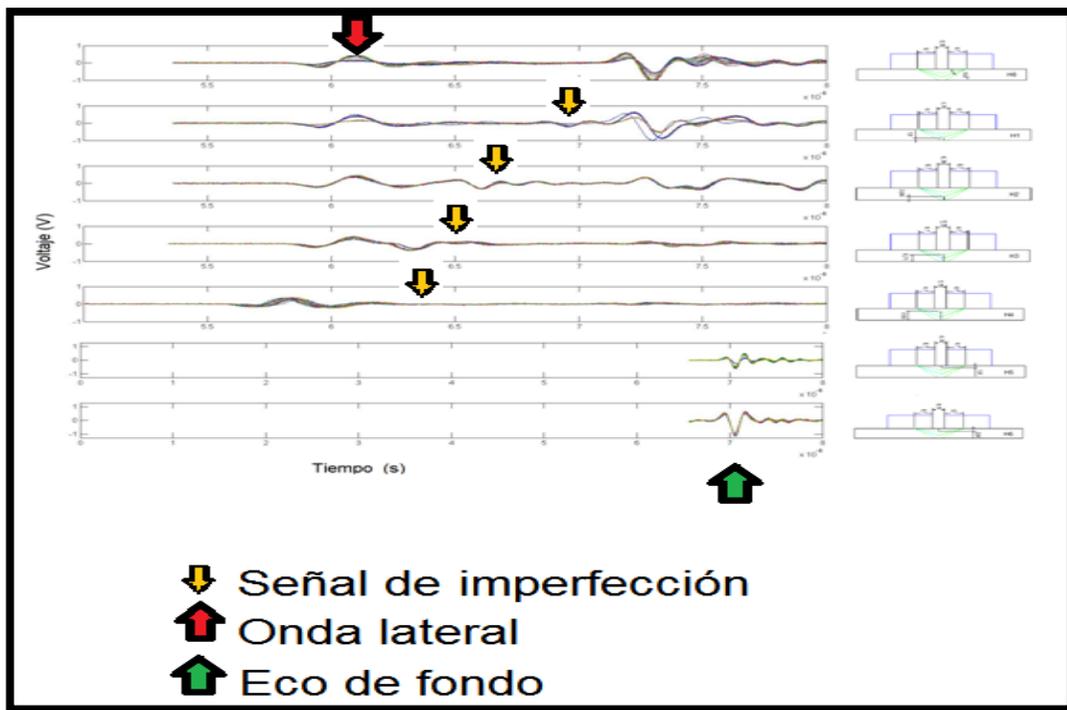


Figura 4.1. Señales de osciloscopio de patrones de referencia con entalla

**Patrón de referencia H0**

Como se puede apreciar en la Figura 4.2. en la imagen TOFD se observan de forma demarcada la silueta de la onda lateral y el eco de fondo.

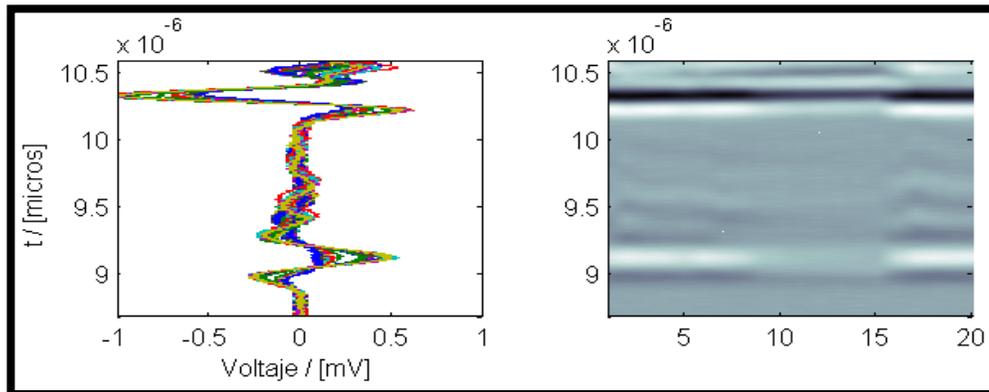


Figura 4.2. Imagen TOFD de Patrón de referencia H0.

**Patrón de referencia H1**

Como se puede apreciar en la Figura 4.3. se observa la presencia de los dos extremos de la imperfección inducida muy cerca de la señal del eco de fondo.

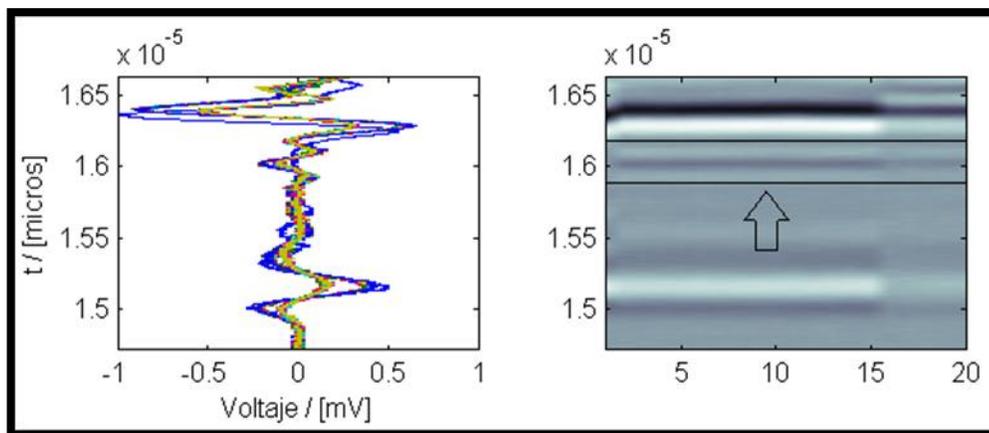


Figura 4.3. Imagen TOFD de patrón de referencia H1.

### Patrón de referencia H2

Como se puede apreciar en la Figura 4.4. se observa con mayor precisión y nitidez los dos extremos de la imperfección inducida con un posicionamiento más alejado del eco de fondo.

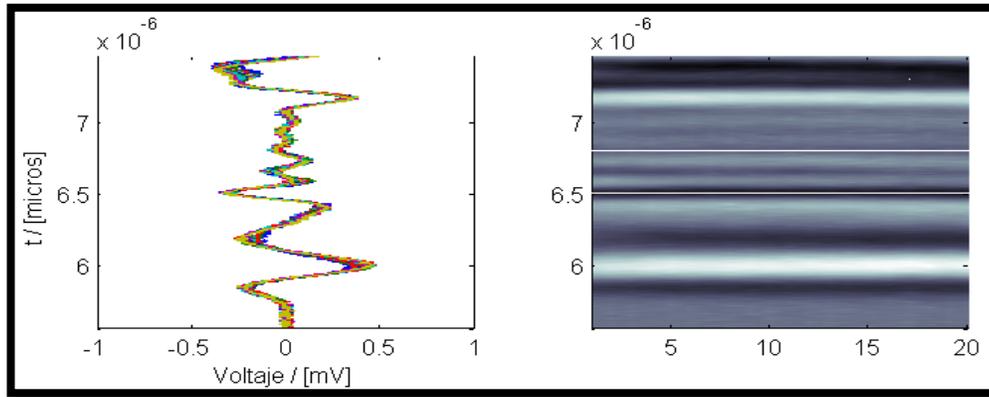


Figura 4.4. Imagen TOFD de patrón de referencia H2.

### Patrón de referencia H3

Como se puede apreciar en la Figura 4.5. se observa con mayor precisión la señal de la onda lateral y de la imperfección no se percibe casi el eco de fondo.

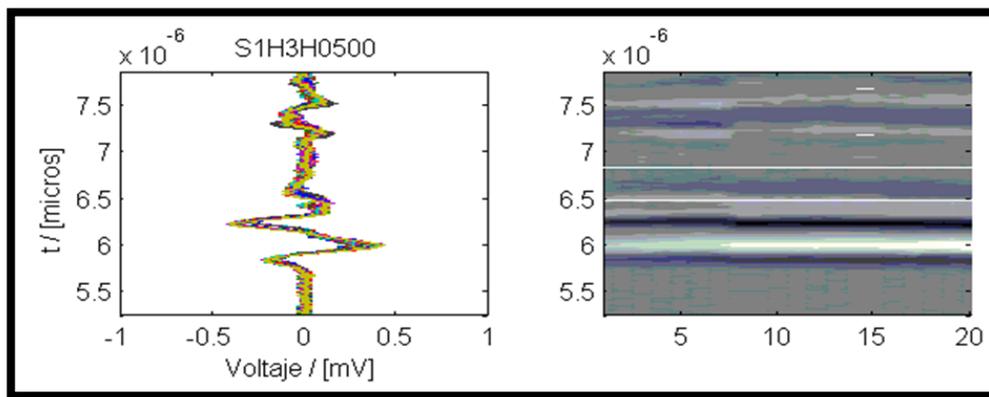


Figura 4.5. Imagen TOFD de patrón de referencia H3.

**Patrón de referencia H4**

Como se puede apreciar en la Figura 4.6. Solo observamos la presencia de la onda lateral, no se observa la señal del eco de fondo.

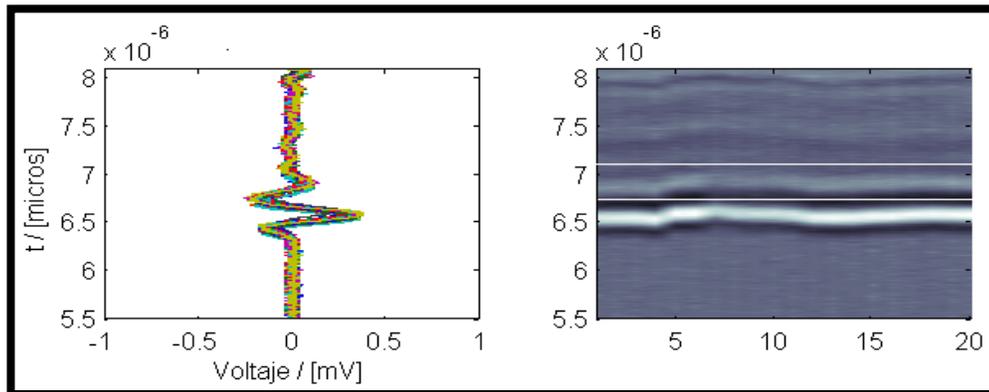


Figura 4.6. Imagen TOFD de patrón de referencia H4.

**Patrón de referencia H5**

Como se puede apreciar en la Figura 4.7. solo se observa la presencia del eco de fondo.

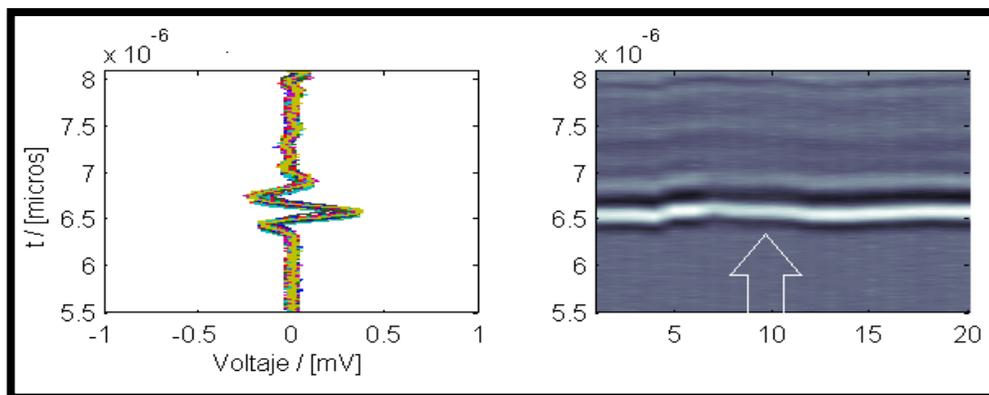


Figura 4.7. Imagen TOFD de patrón de referencia H5.

### Patrón de referencia H6

Como se puede apreciar en la Figura 4.8. solo se observa la presencia del eco de fondo.

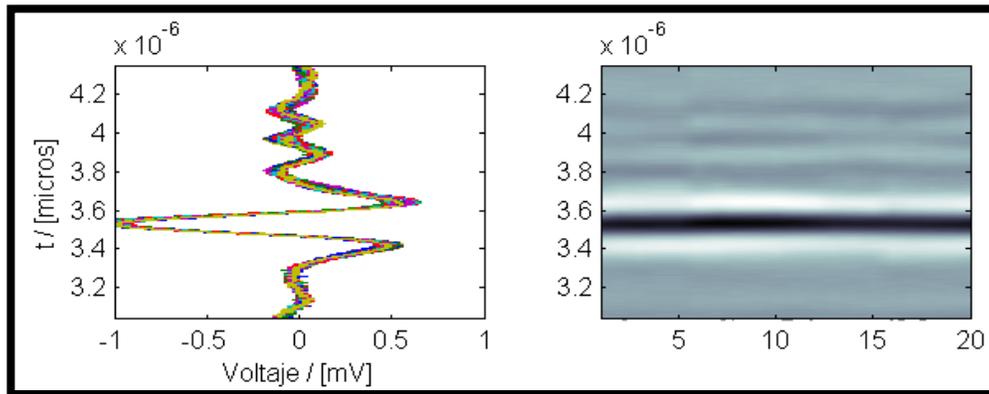


Figura 4.8. Imagen TOFD de patrón de referencia H6.

### 4.2. Patrones de referencias con indicaciones circulares

Se inspecciono a partir del método de TOFD la estructura interna de una serie de patrones de referencias de acero con discontinuidades inducidas que simulan imperfecciones circulares de cierta profundidad.

Se observo que con una separación de 14,95 mm entre zapatas, a partir del patrón de referencia O2 aparece una indicación cerca de la señal del eco de fondo, que resalta la presencia de una imperfección, a medida que disminuye la profundidad con respecto a la cara superior del patrón de referencia la indicación se traslada hacia la zona de la onda lateral y se hace más fuerte la intensidad de la señal. (Ver Apéndice A9)

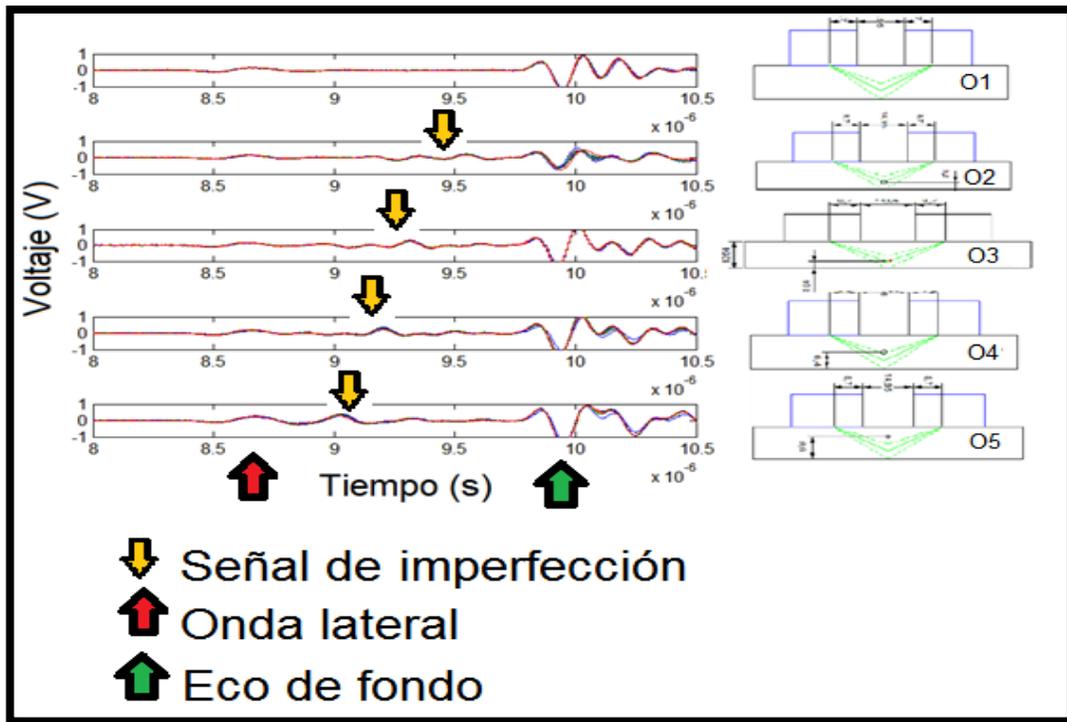


Figura 4.9. Señal de Osciloscopio de patrones de referencias con indicaciones circulares con separación de zapatas de 14,95 mm.

Con una separación entre zapatas de 18,00 mm, a partir del patrón de referencia O6 aparece una indicación cerca de la señal del eco de fondo que indica la presencia de una imperfección, a medida que disminuye la profundidad con respecto a la cara superior del patrón de referencia, la indicación se traslada hacia la zona de la onda lateral y se hace más fuerte la intensidad de la señal. Respecto a la separación anterior entre zapatas la señal obtenida en cada patrón de referencia es más nítida.

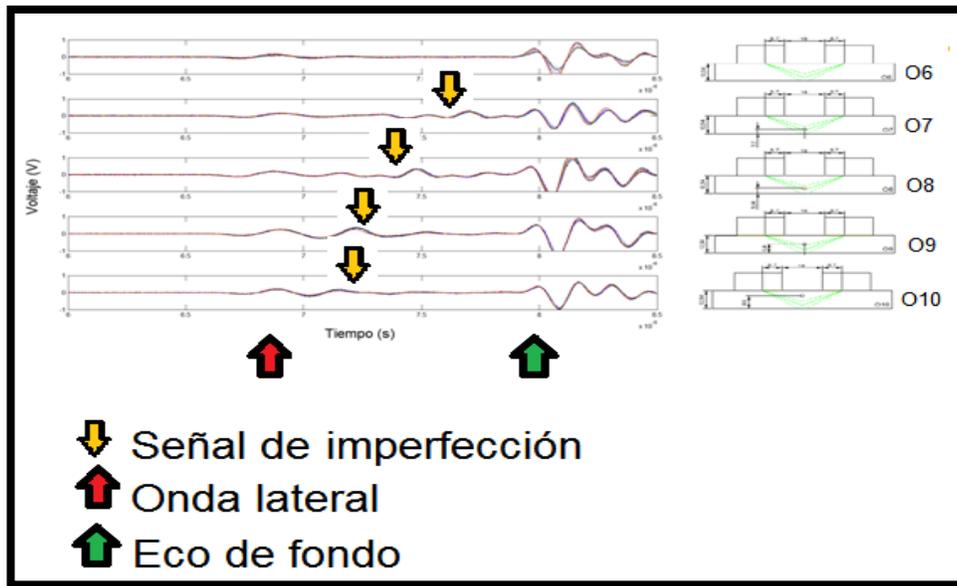


Figura 4.10. Señal obtenida por el osciloscopio de los patrones de referencia con indicaciones circulares con separación de zapatas de 18,00 mm

Con una separación entre zapatas de 14,95 mm, a partir de la patrón de referencia O6

### Patrón de referencia O1

Se observan la silueta de la lateral de forma muy suave y la del eco de fondo con mas nitidez.

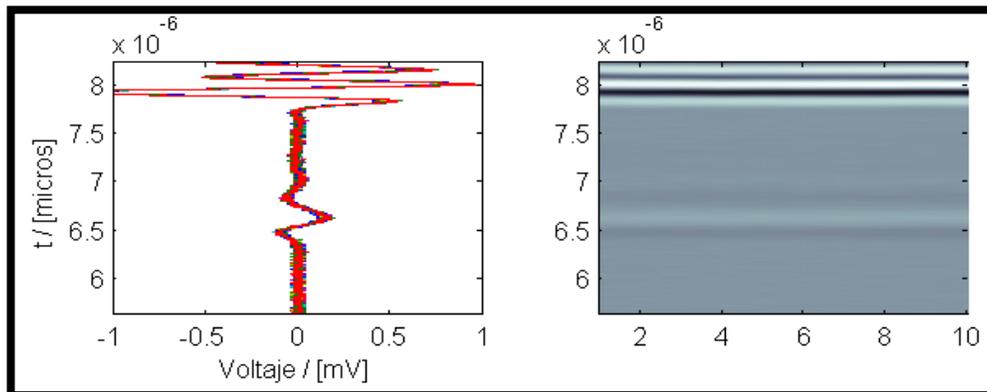


Figura 4.11. Imagen TOFD de patrón de referencia O1.

**Patrón de referencia O2**

Se observan la silueta de la onda lateral, dos siluetas correspondientes a las imperfecciones circulares inducidas y la silueta del eco de fondo.

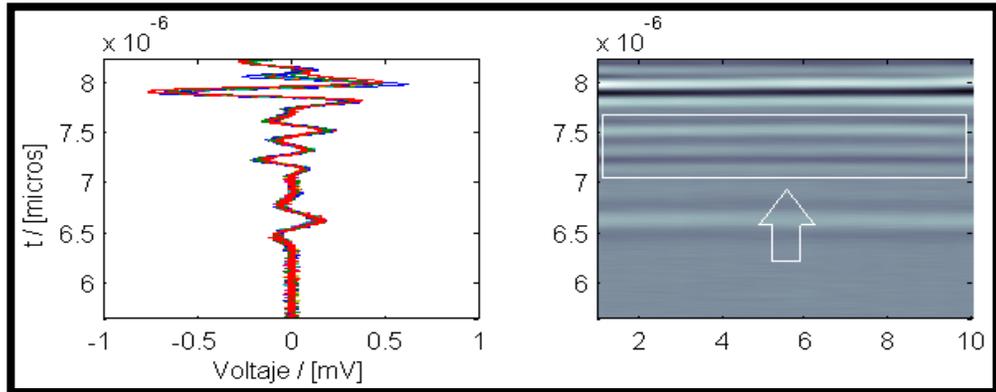


Figura 4.12. Imagen TOFD de patrón de referencia O2.

**Patrón de referencia O3**

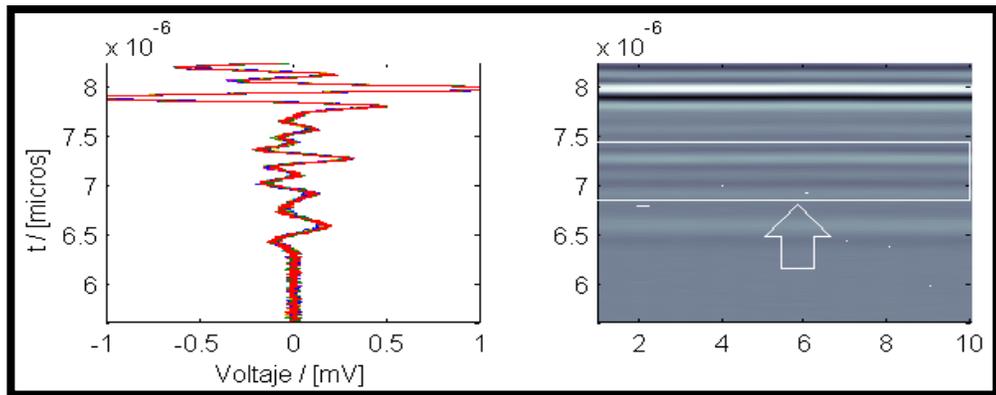


Figura 4.13. Imagen TOFD de patrón de referencia O3

**Patrón de referencia O4**

Se observaron, la silueta de la onda lateral, dos siluetas correspondientes a la imperfección circular inducida, de este par se observa con mejor resolución la correspondiente al borde superior de la imperfección y también el eco de fondo.

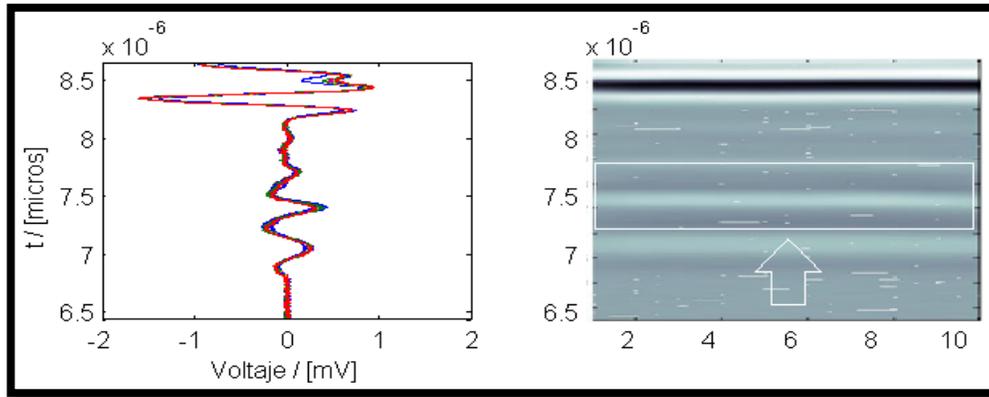


Figura 4.13. Imagen TOFD de patrón de referencia O4.

**Patrón de referencia O5**

Se observó la silueta de la onda lateral con poca intensidad al igual que las dos siluetas de la imperfección inducida. En cuanto al eco de fondo se observó con buena resolución

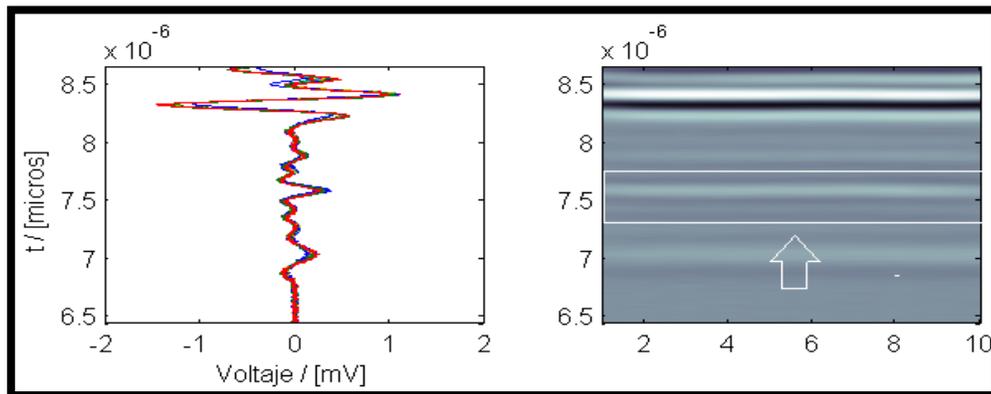


Figura 4.14. Imagen TOFD de patrón de referencia O5.

Con una separación entre zapatas de 18,00 mm, a partir de la patrón de referencia O6.

### Patrón de referencia O6

La silueta de la onda lateral se observo con menos resolución que en el patrón de referencia O1, el eco de fondo se observó con buena resolución.

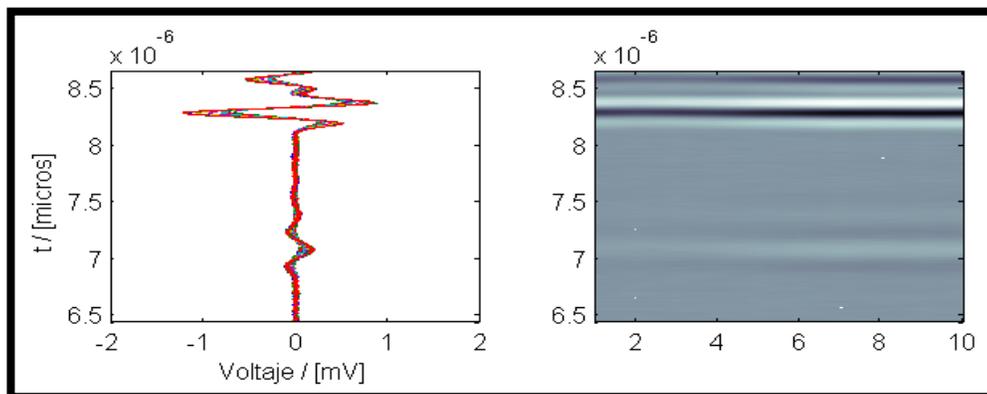


Figura 4.15. Imagen TOFD de patrón de referencia O6.

### Patrón de referencia O7

La onda lateral se observó con buena resolución, las señales de las imperfecciones inducidas son visibles, el eco de fondo se observo con buena resolución.

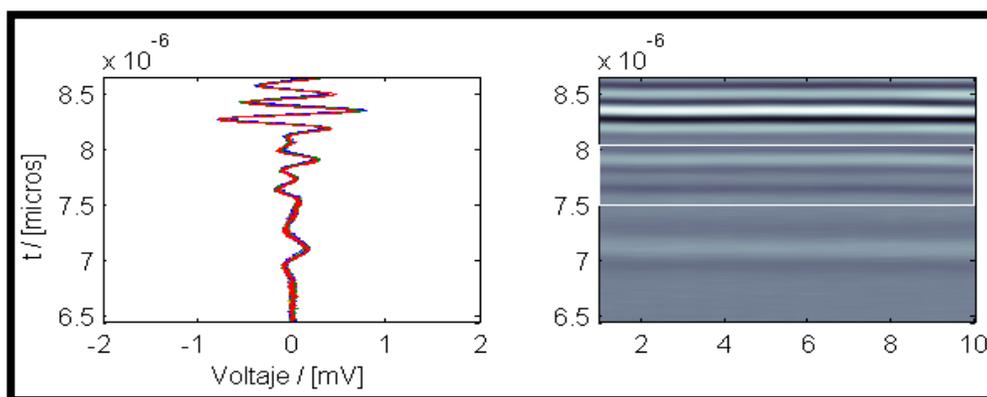


Figura 4.16. Imagen TOFD de patrón de referencia O7.

**Patrón de referencia O8**

Se observo la presencia de la onda lateral de forma muy leve en comparación a 07, las siluetas de los bordes de la imperfección circular se observan levemente y el eco de fondo se observa con buena resolución.

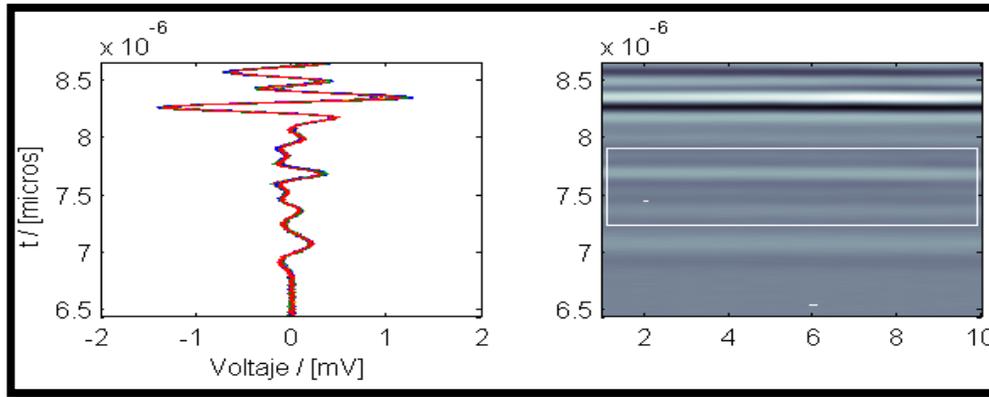


Figura 4.17. Imagen TOFD de patrón de referencia O8.

**Patrón de referencia O9**

Se observó la silueta de la onda lateral, se observaron los bordes de la imperfección circular, se aprecio con mayor resolución la del borde superior de dicha imperfección y muy cerca de la onda lateral.

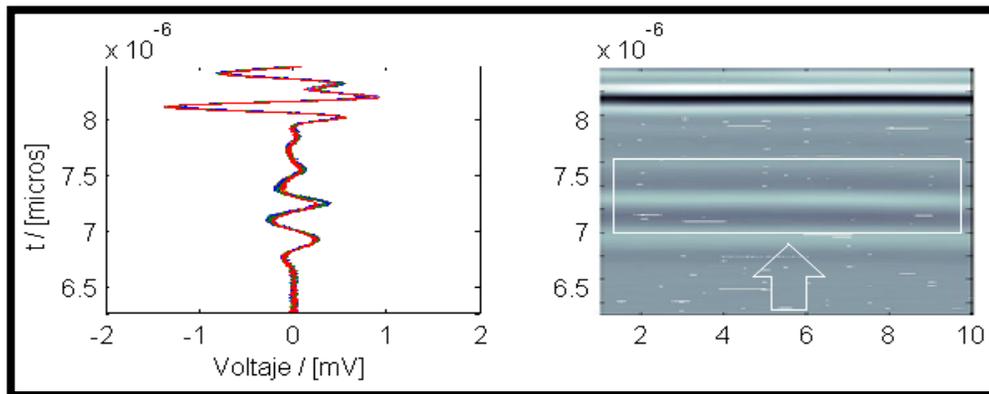


Figura 4.18. Imagen TOFD de patrón de referencia O9.

### Patrón de referencia O10

Se observó la silueta de la onda lateral, se apreció el borde superior de la imperfección circular con mayor resolución aunque con menos intensidad que en la patrón de referencia O9 y más cerca de la onda lateral. El eco de fondo se observó con buena resolución.

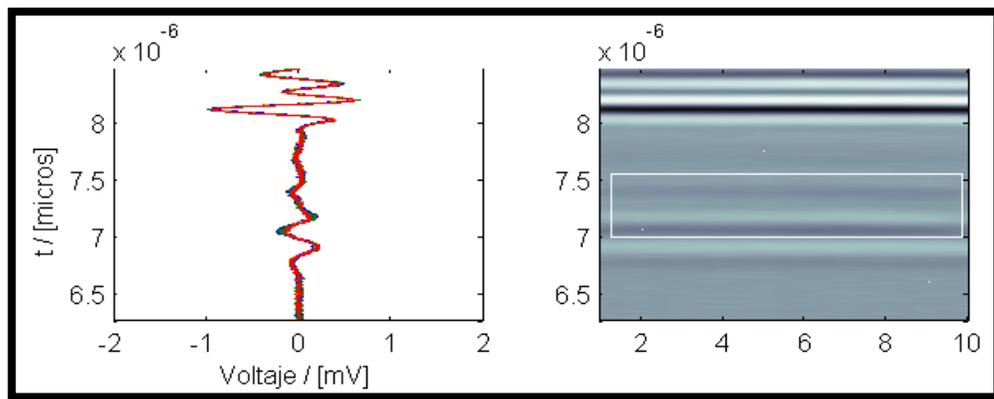


Figura 4.19. Imagen TOFD de patrón de referencia O10.

### 4.3. Sección de lámina soldada.

#### Patrón de referencia P1

Se aprecio una pequeña señal cerca de la onda lateral la cual se identifico como la primera imperfección presente al revisar la radiografía de la placa.

Se apreció una señal de mejor resolución cerca del eco de fondo la cual se identifico como la segunda imperfección presente en el patrón de referencia.

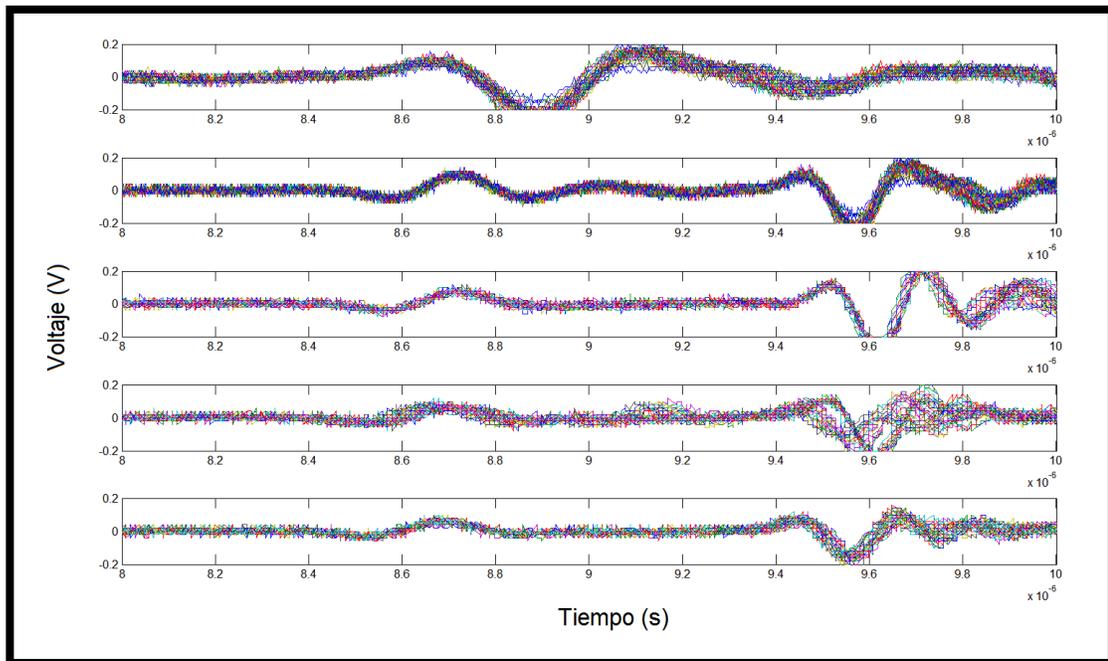


Figura 4.20. Señal de Osciloscopio de sección de lámina soldada con imperfecciones varias con separación de zapatas de 41.30 mm. En la inspección de la imagen TOFD identificada como P1FLAW0 se observó la onda lateral y la señal del eco de fondo bien definidas, con muy buena resolución.

En la inspección de la imagen TOFD identificada como P1FLAW1 se observó una silueta cerca de la onda lateral que corresponde a la imperfección de la grieta de raíz.

En la inspección de la imagen TOFD identificada como P1FLAW2 no se observaron marcas de imperfecciones solo la silueta de onda lateral y el eco de fondo.

En la inspección de la imagen TOFD identificada como P1FLAW3 se observó la onda lateral y marcas de los bordes de la imperfección localizada en esa zona que corresponde a la falta de aporte del material.

En la inspección de la imagen TOFD identificada como P1FLAW4 solo se observaron las siluetas de la onda lateral y el eco de fondo, ambas con muy buena resolución.

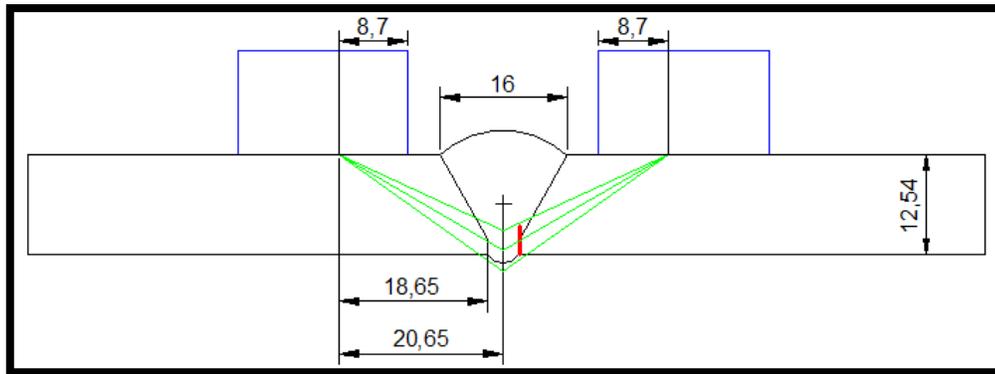


Figura 4.21. Patrón de referencia P1.

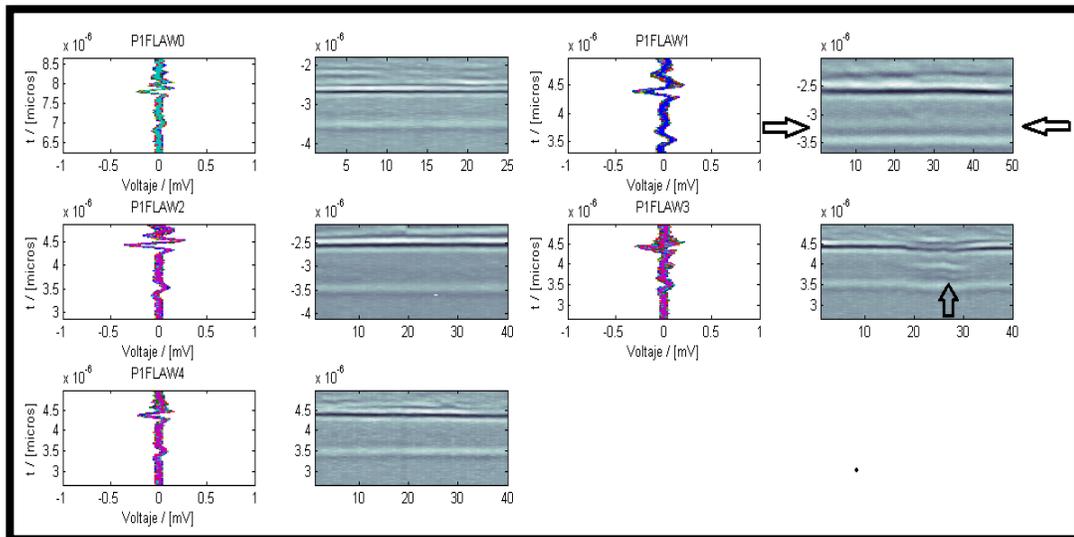


Figura 4.22. Imagen TOFD de Patrón de referencia P1.

### Patrón de referencia P2

Se apreció una leve señal cerca de la onda lateral que corresponde a la falla 1.

Se constató la presencia de una señal bien demarcada que corresponde a la falla 2 cerca de la onda lateral.

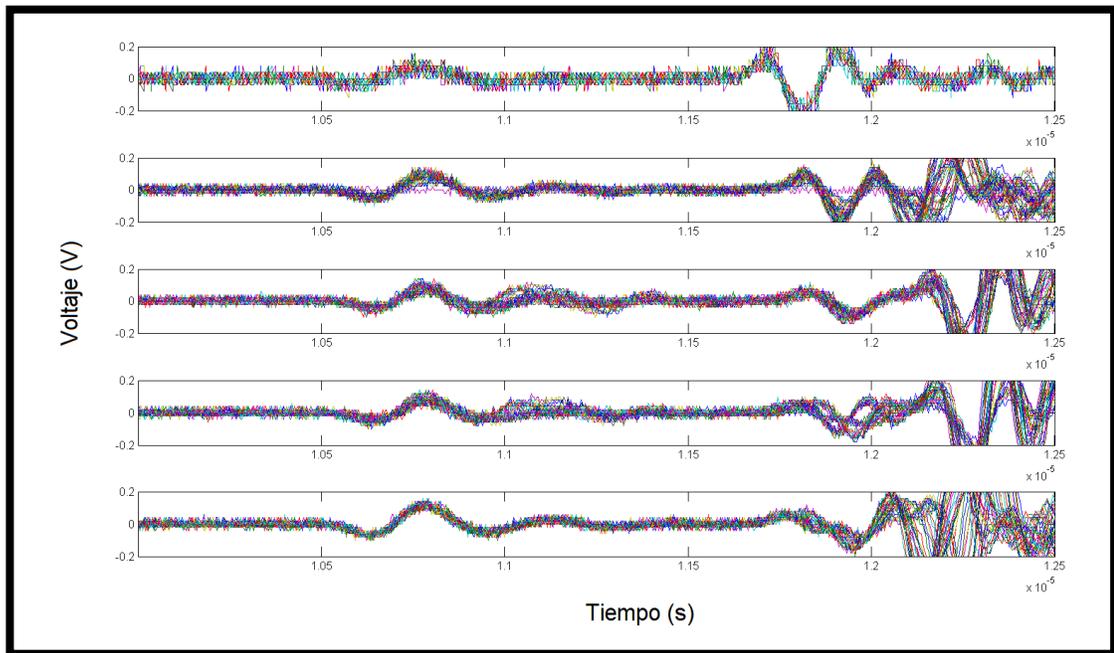


Figura 4.23. Señal de Osciloscopio de Sección de lámina soldada con imperfecciones varias con separación de zapatas de 27.86 mm.

En la imagen de TOFD identificada como P2FLAW0 se observó la silueta de la onda lateral y el eco de fondo que eran las siluetas esperadas por ser la patrón de referencia con el material sano.

En la imagen de TOFD identificada como P2FLAW1 se observó la onda lateral y el eco de fondo siluetas esperadas, se observó también una silueta que corresponde a la imperfección localizada en esa zona muy cerca de la onda lateral de poca intensidad es decir con baja resolución.

En la imagen de TOFD identificada como P2FLAW2 se observaron las siluetas de la onda lateral y del eco de fondo, este último con una menor resolución en comparación con las 2 imágenes anteriores.

En la imagen de TOFD identificada como P2FLAW3 se observó la presencia de la onda lateral y del eco de fondo con buena resolución. Se encontraron siluetas entre la onda lateral y el eco de fondo que corresponden al borde superior e inferior de la imperfección presente en esa zona la cual está clasificada como falta de fusión.

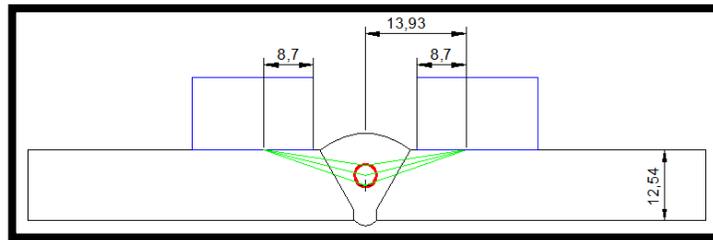


Figura 4.24. Patrón de referencia P2

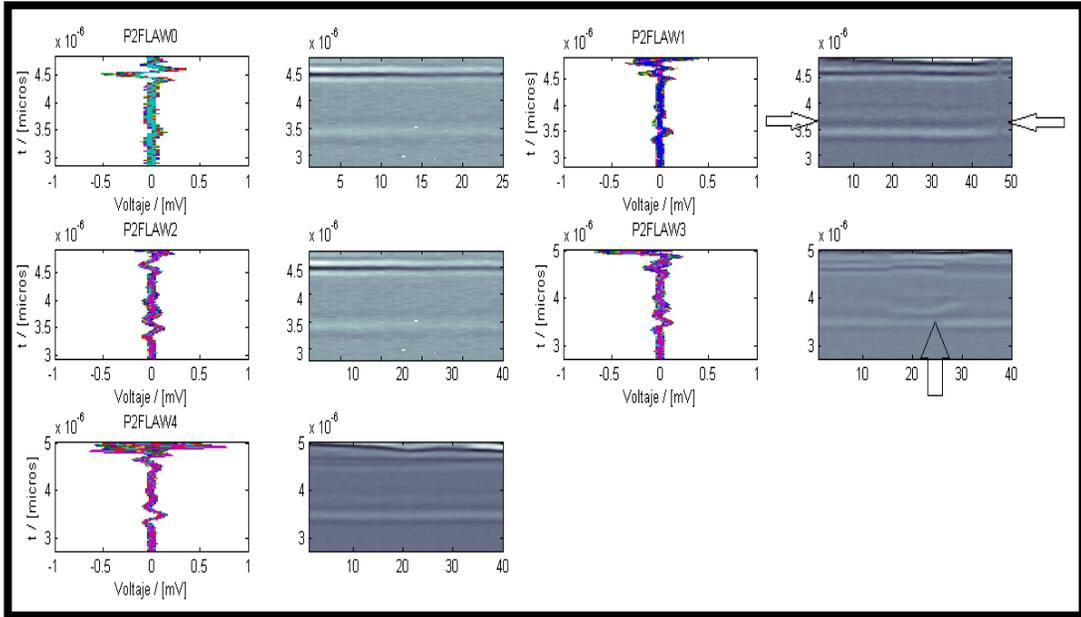


Figura 4.25. Imagen TOFD de Patrón de referencia P2.

**Patrón de referencia P3**

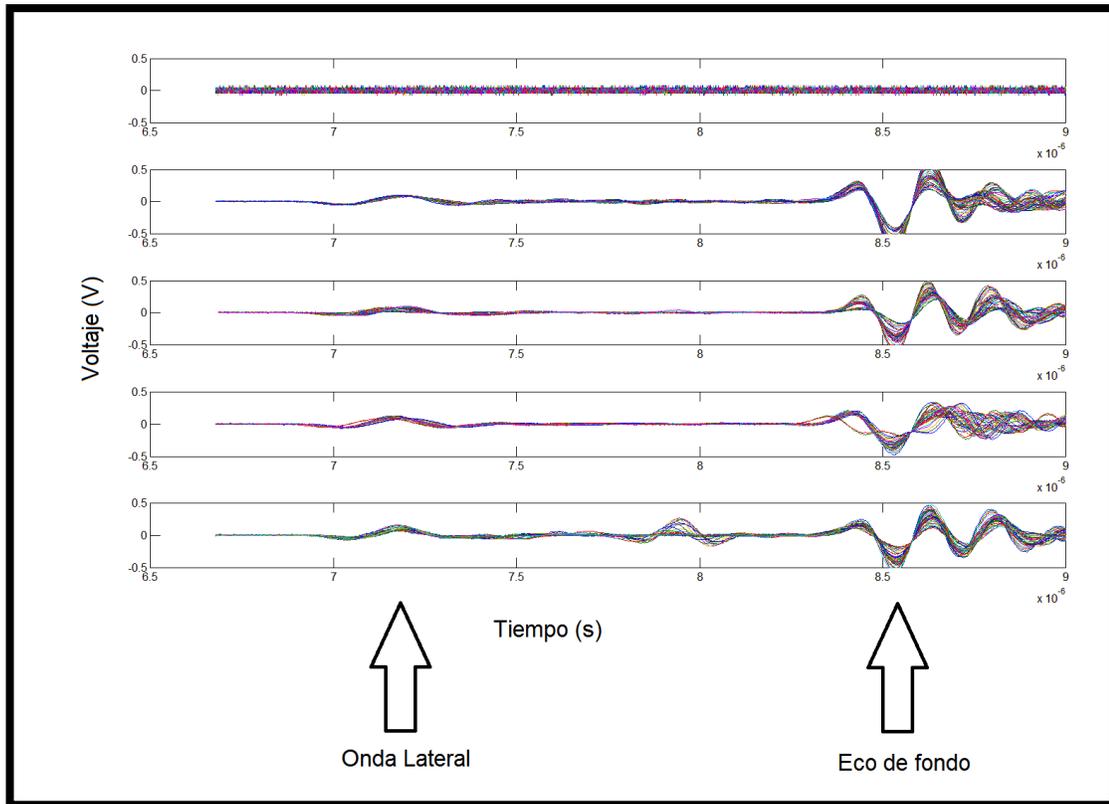


Figura 4.26. Señal de Osciloscopio de Sección de lámina soldada con imperfecciones varias con separación de zapatas de 20 mm.

En la inspección de P3FLAW0 observamos la silueta de la onda lateral y el eco de fondo con muy buena resolución.

En la inspección de las imágenes TOFD identificadas como, P3FLAW1, P3FLAW2, y P3FLAW3 no se observó ninguna imperfección. Se aprecia en las imágenes TOFD P3FLAW1 y P3FLAW2 que la onda lateral no era detectada.

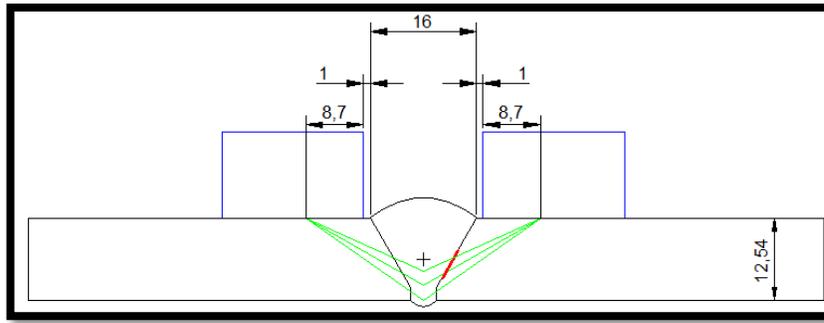


Figura 4.27. Patrón de referencia P3.

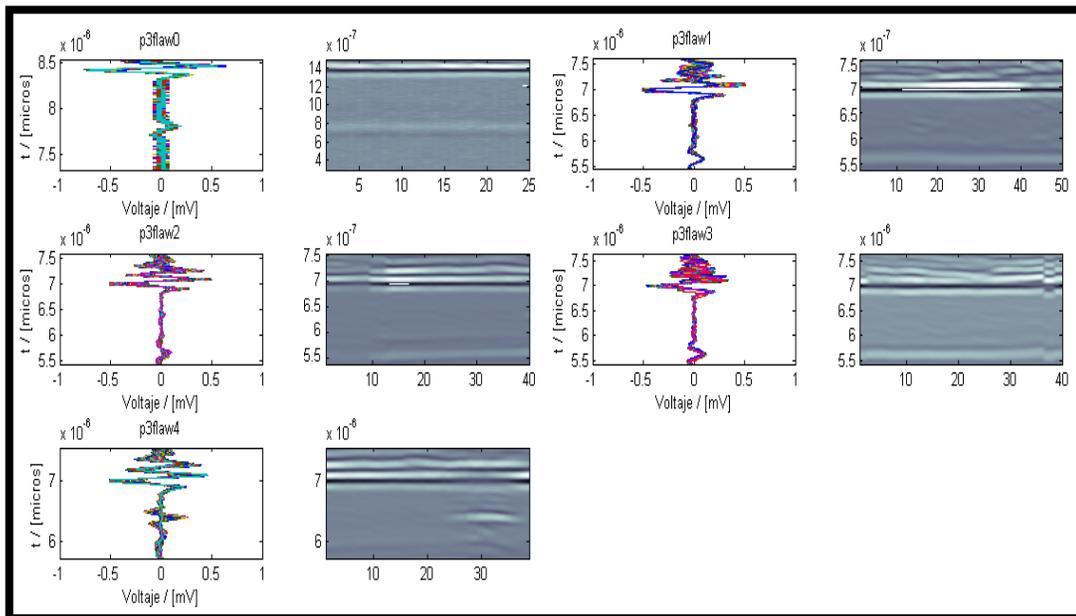


Figura 4.28. Imagen TOFD de patrón de referencia P3.

### 4.3 Ensayo radiográfico realizado al patrón de referencia calibrado



Figura 4.29. Radiografía realizada al patrón de referencia de la sección de lámina soldada.

Fecha de realización	19/03/2012
Espesor (t)	18 mm
Corriente eléctrica (I)	100 mAmp x min
Kilo-Voltaje Pico	140 kVp
Densidad	1,2 kg/mm
Amperaje	6 mAmp

Tabla 4.3. Datos de radiografía industrial

Pantalla arriba		0,127 mm
Pantalla abajo		0,254 mm

Tabla 4.4. Espesores de pantallas protectoras de la lámina radiográfica.

Disparo	Descanso	Kilo-Voltaje Pico
5,6 min	2 min	140 kVp
5,6 min	2 min	140 kVp
5,6 min	2 min	140 kVp

Tabla 4.5. Parámetros usados para realizar el ensayo radiográfico.

Comparando las longitudes observadas en el ensayo radiográfico al patrón de referencia calibrado con el barrido de mayor separación entre zapatas encontramos que la exactitud de este último es bastante buena pues el valor observado en la imagen se encuentra bastante cercano al valor medido en la radiografía obtenida.

#### 4.4 Calculo de tiempo de vuelos y errores

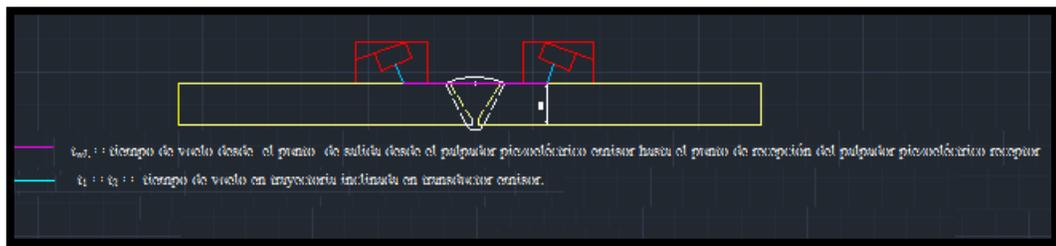


Figura 4.30. Esquema de trayectoria de tiempos de vuelo de la onda lateral.

$t_L$  = tiempo de vuelo de onda lateral.

$t_1$  = tiempo de vuelo en trayectoria inclinada en transductor emisor.

$t_2$  = tiempo de vuelo en trayectoria inclinada en transductor receptor.

$t_{wL}$  = tiempo de vuelo desde el punto de salida desde el palpador piezoeléctrico emisor hasta el punto de recepción del palpador piezoeléctrico receptor.

$$t_L = t_1 + t_2 + t_{wL} \quad \text{Ecuación 4.1.}$$

$$\text{Si } t_1 = t_2 \quad \text{Ecuación 4.2.}$$

$$t_L = 2 * t_1 + t_{wL} \quad \text{Ecuación 4.3.}$$

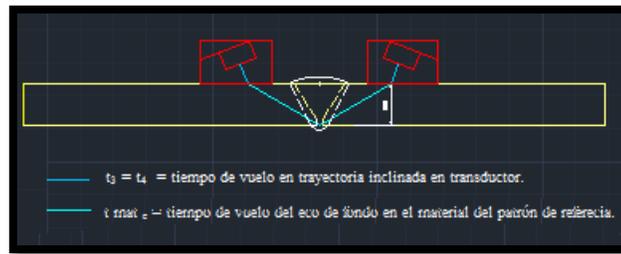


Figura 4.31. Esquema de trayectoria de tiempo de vuelos del eco de fondo

$t_e$  = Tiempo de vuelo de eco de fondo.

$t_3$  = tiempo de vuelo en trayectoria inclinada en transductor emisor.

$t_4$  = tiempo de vuelo en trayectoria inclinada en transductor receptor.

$t_{mat e}$  = tiempo de vuelo del eco de fondo en el material del patrón de referencia.

$\Delta t$  = Diferencia entre el tiempo de vuelo del eco de fondo y el tiempo de vuelo de la onda lateral

$$t_e = t_3 + t_4 + t_{mat e} \quad \text{Ecuación 4.4.}$$

$$\text{Si } t_3 = t_4$$

$$t_e = 2 * t_3 + t_{mat e} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$\Delta t = t_e - t_l = 2 * t_3 + t_{mat e} + t_{wL} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

$$\text{Si } t_3 = t_l \implies \Delta t = 2 * t_3 + t_{mat e} - 2 * t_3 - t_{wL}$$

$$\implies \Delta t = t_{mat e} - t_{wL} \quad \text{Ecuación 4.7.}$$

Patrones de referencia	H0	H1	H2	H3	H4
$\Delta t$ teórico	0,000002967	0,000002967	0,000002967	0,000002967	0,000002967
$\Delta t$ Exp.	0,000001268	0,000001246	0,000002771	n/a	n/a
Error	0,000001699	0,00000171	0,000000196	n/a	n/a

Tabla 4.6. Resultados de cálculo de  $\Delta t$  para patrones Ho, H1, H2, H3, H4.

Podemos observar que la diferencia de tiempos entre la onda lateral y el eco de fondo es similar en cada probeta donde fue determinado, en el caso de H3 no fue posible determinar un valor preciso para el tiempo de vuelo del eco de fondo, por lo tanto no fue posible determinar la diferencia de tiempos de vuelo entre la onda lateral y el eco de fondo.

En el caso de H4 no fue posible determinar el eco de fondo, debido a que la trayectoria de la señal es interrumpida por el vacío de la ranura trayendo como consecuencia que no haya reflexión de la señal a través del material debido a la ausencia del mismo en ese sector.

Patrones de referencia	H5	H6
$\Delta t$ teórico	0,000002967	0,000002967
$\Delta t$ Experimental	n/a	n/a
Error	n/a	n/a

Tabla 4.7. Resultados de cálculo de  $\Delta t$  para patrones de referencia H5 y H6

En H5 y H6 no fue posible determinar la diferencia de tiempo entre la onda lateral y el eco de fondo, debido a que no fue posible detectar la onda lateral ya que esta se interrumpe al encontrarse el vacío ocasionado por la ausencia de material en la entalla.

Probetas	O1	O2	O3	O4	O5
$\Delta t$ teórico	0,000002818	0,000002818	0,000002818	0,000002818	0,000002818
$\Delta t$ Experimental	0,000001304	0,000003073	0,000001300	0,000092125	0,000001298
Error	0,000001514	0,000000255	0,000001518	0,000089307	0,000001520

Tabla 4.8. Resultados de cálculos de  $\Delta t$  para patrones de referencias O1, O2, O3, O4,

Patrones de referencia	O6	O7	O8	O9	O10
$\Delta t$ teórico	0,000002779	0,000002779	0,000002779	0,000002779	0,000002779
$\Delta t$ Experimental	0,000001208	0,00000116	0,000001194	0,000001194	0,000001208
Error	0,000001571	0,000001619	0,000001585	0,000001585	0,000001571

Tabla 4.9. Resultados de cálculos de  $\Delta t$  para patrones de referencia O6, O7, O8, O9, O10.

En O6, O7, O8, O9 Y O10  $\Delta t$  experimental mantiene valores con una precisión aceptable y una exactitud constante con respecto al valor teórico.

Patrones de referencia	P1FLAW1	P1FLAW2	P1FLAW3	P2FLAW1	P2FLAW2
$\Delta t$ teórico	0,000002586	0,000002586	0,000002586	0,000002680	0,000002680
$\Delta t$ Experimental	0,000000856	0,000000880	0,000000870	0,000001140	0,000001496
Error	0,000001730	0,000001706	0,000001716	0,000001540	0,000001184

Tabla 4.10.. Resultados de cálculos de  $\Delta t$  para patrones de referencia P1FLAW1, P1FLAW2, P1FLAW3, P2FLAW1, P2FLAW2.

En P1FLAW1, P1FLAW2 y P1FLAW3 observamos que hay una buena precisión en los valores obtenido experimentalmente pero no muy buena exactitud con respecto al valor teórico.

Patrones de referencia	P2FLAW3	P3FLAW1	P3FLAW2	P3FLAW3
$\Delta t$ teórico	0,000002680	0,000002746	0,000002746	0,000002746
$\Delta t$ Experimental	0,000001500	0,000002854	0,000000048	0,000001128
Error	0,000001180	0,000005600	0,000002794	0,000001618

Tabla 4.11. Resultados de cálculos de  $\Delta t$  para patrones de referencia P2FLAW3, P2FLAW3, P3FLAW1, P3FLAW2, P3FLAW3.

En P2FLAW1, P2FLAW2 y P2FLAW3 hay buena precisión en los valores experimentales de  $\Delta t$  pero una inexactitud significativa con respecto a los valores reales.

En P3FLAW1, observamos una buena exactitud con respecto al valor teórico obtenido, en P3FLAW2 una significativa inexactitud con respecto al valor teórico al igual que una significativa imprecisión con respecto a los valores obtenidos experimentalmente. En P3FLAW3 mejora la precisión comparado con P3FLAW2 y se observa una exactitud aproximada con P3FLAW1.

Patrón de referencia	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6
Espesor de la imperfección	n/a	0,592	0,367	0,509	n/a	n/a	n/a

Tabla 4.12. Dimensión de espesores de imperfección obtenidas en patrones de referencias con indicaciones planas

En los patrones de referencia H1, H2, H3 los valores obtenidos carecen de precisión y exactitud.

Patrón de referencia	O1	O2	O3	O4	O5
Espesor de la imperfección (a)	N/A	1,8352	1,2432	2,37984	1,58656

Tabla 4.12. Dimensión de espesores de imperfección obtenidos en patrones de referencia con indicaciones circulares y separación entre zapatas de 14,95 mm.

En O1 y O4 se observaron valores con buena exactitud y entre los patrones de referencia O1, O2, O3, O4 y O5 se observó una precisión aceptable dada las condiciones del experimento.

Patrón de referencia	O6	O7	O8	O9	O10
Espesor de la imperfección	n/a	1,5903	1,46072	2,73296	1,46072

Tabla 4.13. Dimensión de espesores de imperfección obtenidos en patrones de referencia con indicaciones circulares y separación entre zapatas de 18 mm

Se aprecia en los patrones una precisión y exactitud aceptable con respecto al valor medido con el vernier.

---

## CONCLUSIONES

La imagen TOFD es construida a través del eco que retorna del material.

Mediante los resultados obtenidos por el método de tiempo de vuelo de difracción en modo de transmisión se determinó que las amplitudes de pantalla del eco de fondo van disminuyendo a medida que aumenta el tamaño de la entalla.

Se pudo determinar que a medida que la entalla se encuentre entre 0,00 mm y 4,00 mm de la cara superior del patrón de referencia no habrá onda lateral pues será interrumpida por la entalla y está no será detectada debido a que se encontrará fuera del ángulo de barrido de las zapatas piezoeléctricas.

Se puede decir que la técnica ultrasónica TOFD, suministra información que al ser procesada nos permite rápidamente saber la longitud y profundidad de la imperfección con solo observar la imagen obtenida.

Las indicaciones circulares se apreciaron más fácilmente en comparación con los patrones de referencia con entallas.

Con la separación entre zapatas piezoeléctricas mas pequeña, se pueden apreciar los extremos de la indicación con mayor nitidez en la imagen de TOFD.

Al igual que en los patrones de referencia con entallas a medida que la indicación circular se acerca a la cara superior, disminuye la intensidad de su silueta.

---

## RECOMENDACIONES

Disminuir el tiempo de inspección.

Automatizar el barrido de la señal.

Mejorar el programa y/o utilizar otro software para disminuir el tiempo de procesamiento.

Realizar varios barridos con diferentes separaciones entre las zapatas piezoeléctricas a fin de obtener una mejor resolución en la imagen de TOFD.

Se recomienda investigar opciones para la aplicación de otras técnicas de procesamiento de datos.

Realizar barridos con diferentes ángulos con la finalidad de observar las indicaciones desde puntos de referencia distintos.

Utilizar procesadores de datos de mayor velocidad.

Determinar el mejor tiempo de muestreo.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A370-97a, A. (s.f.). *Standard Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel*.
2. Agency for Toxic Substances & Disease Registry. (s.f.). Obtenido de [http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts149.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts149.html)
3. Agranat, B. D. (1990). *Fundamentos de la física y la técnica de ultrasonidos*. Moscu: Editorial MIR.
4. American Society of Testing and Materials. (18 de 10 de 2008). Standard practice for use of ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique. Pasadena, United States of America.
5. American Standard of Mechanical Engineers. (1 de 7 de 2010). Nondestructive examination - ASME Boiler and Pressure Vessel code. Asme International.
6. AQCenter. (s.f.). Recuperado el 1 de Octubre de 2011, de <http://www.aqc.com.ve/NormasCOVENIN/NormasCoveninCOVEN.htm>
7. Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. México: International Thomson Editores.
8. ASNT. (1993). *Non destructive testing handbook* (Segunda Edición. ed., Vol. VIII). United States of America: ASNT.
9. ASNT. (2007). *Nondestructive Testing Handbook* (Tercera Edición ed., Vol. VII). United States of America: ASNT.
10. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. (s.f.). *ARPANSA - Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*. Recuperado el 13 de Febrero de 2012, de [www.arpansa.gov.au](http://www.arpansa.gov.au)

- 
11. Baby, S. B. (2002). *Time of flight diffraction (TOFD) technique for accurate sizing of surface breaking cracks*. Chennai: National seminar of ISNT.
  12. Balasubramaniam, K. B. (2006). *Inspection using shear wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique*. Chennai, India: Centre for Nondestructive evaluation and department of mechanical engineering.
  13. British Standards Institution. (2004). *Welding - Use of flight diffraction technique. (TOFD) for examination of welds*. London: IHS.
  14. British Standards Institution. (2008). *Non-destructive testing- Qualification and certification of NDT personnel. - General principles*. London: IHS.
  15. Callister, W. (1999). *Materials Science and Engineering An Introduction*. Salt Lake City: Wiley.
  16. Cano, J. P. (s.f.). *www.educaplus.org*. Recuperado el 01 de Mayo de 2012, de <http://www.educaplus.org/play-127-Ondas-longitudinales-y-transversales.html>
  17. Cheeke, D. (2002). *Fundamentals and applications of ultrasonics waves*. Montreal: CRCR Press LLC.
  18. COVENIN. (2000). 4001:2000 Sistema de Gestión de Seguridad e Higiene Ocupacional (SGSHO) Requisitos. *Consejo Superior N° 2000-05* (pág. 19). Caracas, Venezuela: FONDONORMA.
  19. COVENIN. (2000). 4004:2000 Sistema de Gestión de Seguridad e Higiene Ocupacional (SGSHO) Guía para su Implantación. *Reunión de Consejo Superior N° 2000-05* (pág. 31). Caracas, Venezuela: FONDONORMA.
  20. De Gracia, S. (1998). *Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras*. Madrid, España: Mc Graw Hill/Interamericana de España.

- 
21. General Dynamics. (1977). *Classroom Training book - Non destructive testing magnetic particle* (Segunda Edición ed.). United States of America: Convair Division.
  22. Gonzalez, J. L. (1995). *Metalurgia Mecánica*. Mexico: Limiusa.
  23. Hecht, A. (1997). *Time of flight diffraction technique (TOFD) - An ultrasonic Testing Method for all applications?* (Vol. II). NDT.net.
  24. Honarvar, F. y. (2008). *Reference wavelets used for deconvolution of ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) signals*. Shanghai.
  25. Hong Kong Observatory. (s.f.). Recuperado el 22 de Febrero de 2012, de <http://www.hko.gov.hk//education/dbcp/radiation/eng/r2.htm>
  26. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (1989). Nota Técnica de Prevención NTP 1. Estadísticas de accidentabilidad en la empresa., (pág. 7). España.
  27. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2008). Notas Técnicas de Prevención NTP 330. Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidentes., (pág. 7).
  28. INTA. Instituto Nacional de Técnicas Aeroespacial. (1980). *Introducción a los Métodos de Ensayos no Destructivos*. Madrid.
  29. International Atomic Energy Agency. (2000). *Liquid penetrant and magnetic particle testing at level 2*. Vienna.
  30. International Standards Organization. (2010). *Non-destructive testing. Qualification and certification of NDT personnel - General principles*. ISO.
  31. ISO 9001:2000. (2000). *Reunión del Consejo Superior N° 2001-02* (pág. 36). Venezuela: FONDONORMA.

- 
32. J., M. C. (s.f.). *Ultrascope TOFD: Un sistema compacto para la captura y procesamiento de imágenes*. Madrid: IAI-DASEL.
  33. Kisella, T. (2004). *Study Guide - Radiographic Testing Methods Level III*. United States of America: ASNT.
  34. Krautkramer, J. y. (1977). *Ultrasonic Testing of Material*. Berlin: Springer - Velarg.
  35. Laya, J. (1996). *Introducción a los métodos de los ensayos no destructivos*. Caracas: Facultad de Ingeniería UCV.
  36. Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio ambiente de trabajo. (2005). *Gaceta Oficial N° 38.236*, (pág. 112). Caracas, Venezuela.
  37. Moles, M. (2008). *A Complete Solution for Weld Inspections - Phased Arrays and Disffraction Sizing*.
  38. Murugaiyan, R. (s.f.). *Time of flight diffraction (TOFD), an advanced non-destructive testing technique for inspection of welds for heavy walled pressure vessels*.
  39. Olympus NDT Inc. (s.f.). *Olympus*. Recuperado el 17 de 05 de 2012, de <http://www.olympus-ims.com/es/all-products/>
  40. Organización Mundial de la Salud. (Octubre de 2006). Recuperado el Julio de 2011, de [http://www.who.int/governance/eb/who\\_constitution\\_sp.pdf](http://www.who.int/governance/eb/who_constitution_sp.pdf)
  41. Petcher, P. y. (2009). *Use of sparse array for time of flight diffraction and imagin (TOFDI)*. Coventry, United Kingdom.
  42. Reglamento de las Condiciones de Higiene y Seguridad en el Trabajo. (1973). *Gaceta Oficial N°1631*, (pág. 110). Caracas, Venezuela.

- 
43. Rienstra, S. y. (2004). *An introduction to acoustics*. Vienna: Eindhoven University of Technology.
44. Romera, J. L., & Otros. (2004). *Manual de Evaluación de Riesgos Laborales*, (pág. 206). Andalucía, España.
45. Russel, D. (s.f.). *The Graduate Program in Acoustics at Penn State* . Recuperado el 02 de 02 de 2012, de <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>
46. Serrano, C. (1996). *Introducción a los ensayos no destructivos*. Caracas: Facultad de Ingeniería - UCV.
47. Serway, R. (2005). *Física para ciencias e Ingeniería con física moderna. Volumen 2*. México: Editec, S. A.
48. Shyamal, M. y. (2000). *An overview TOFD method and its mathematical model*. (Vol. V). United Kingdom: NDT.net.
49. Spaulding, W. y. (1998). *Study guide - Radiografic Testing Methods*. United States of America: ASNT.
50. Vander Voort, G. F. (2000). *ASM Handbook: Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International.
51. *World Health Organization*. (s.f.). Recuperado el Febrero de 2012, de [http://www.who.int/topics/radiation\\_non\\_ionizing/en/](http://www.who.int/topics/radiation_non_ionizing/en/)
52. Zahran, O. y.-N. (2006). *Image processing for accurate sizing of weld defects using ultrasonic time of flight diffraction*. Liverpool: ECNDT.

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Dimensiones de las patrones de referencias con entallas .....	65
Tabla 3.2. Dimensiones de los patrones de referencias con indicaciones circulares. ....	66
Tabla 3.3. Nomenclatura de codificación de patrones de referencia.....	71
Tabla 3.4. Nomenclatura de codificación de patrones de referencia.....	72
Tabla 3.5. Nomenclatura de codificación de patrones de referencia.....	73
Tabla 3.6. Dimensiones de la sección de lámina soldada. ....	77
Tabla 3.7. Especificaciones de las imperfecciones presentes en la sección de lámina soldada. .....	77
Tabla 3.8 Nomenclatura de codificación de mediciones. ....	80
Tabla 4.1. Propiedades mecánicas ASISI 1045 .....	82
Tabla 4.2. Propiedades químicas. ....	82
Tabla 4.3. Datos.....	101
Tabla 4.4. Espesores de pantallas protectoras de la lámina radiográfica.....	101
Tabla 4.5. Parámetros usados para realizar el ensayo radiográfico. ....	101
Tabla 4.6. Resultados de cálculo de $\Delta t$ para patrones Ho, H1, H2, H3, H4.....	104
Tabla 4.7. Resultados de cálculo de $\Delta t$ para patrones de referencia H5 y H6.....	104
Tabla 4.8. Resultados de cálculos de $\Delta t$ para patrones de referencias O1, O2, O3, O4, .....	105
Tabla 4.9. Resultados de cálculos de $\Delta t$ para patrones de referencia O6, O7, O8, O9, O10. .....	105
Tabla 4.10. Resultados de cálculos de $\Delta t$ para patrones de referencia P1FLAW1, P1FLAW2, P1FLAW3, P2FLAW1, P2FLAW2. ....	105
Tabla 4.11. Resultados de cálculos de $\Delta t$ para patrones de referencia P2FLAW3, P2FLAW3, P3FLAW1, P3FLAW2, P3FLAW3. ....	106

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Espectro acústico. ....	44
Figura 2.2. Onda longitudinal.....	48
Figura 2.3. Onda transversal. ....	49
Figura 2.4. Onda de superficie. ....	49
Figura 2.5. Onda de Lamb. ....	50
Figura 2.6. Onda plana que se propaga a la derecha.....	52
Figura 2.7. Una onda plana con longitud $\lambda$ incide sobre una barrera en la que hay una abertura de diámetro $d$ . a) Cuando $\lambda \ll d$ , los rayos siguen en una trayectoria de línea recta. b) Cuando $\lambda \cong d$ , los rayos se extienden después de pasar la abertura. c) Cuando $\lambda \gg d$ , la abertura se comporta como fuente puntual que emite ondas esféricas. ....	53
Figura 2.8. Representación esquemática de a) reflexión especular, donde todos los rayos reflejados son paralelos entre si y b) reflexión difusa, donde los rayos reflejados viajan en direcciones aleatorias, fotografías de reflexión especular y difusa con luz láser. ....	54
Figura 2.9. Onda de reflexión.....	55
Figura 2.10. Configuración tiempo de vuelo de difracción.....	57
Figura 2.11. Forma de barrido. La flecha indica la dirección de la misma a lo largo del cordón de soldadura .....	59
Figura 2.12. A la izquierda se muestra la imagen obtenida por tiempo de vuelo. La flecha representa la dirección del barrido. La línea discontinua a la derecha representa un ejemplo de traza aproximada que se representa a la derecha. La escala horizontal corresponde a la longitud de barrido en milímetros y la vertical cubre desde la superficie superior a la inferior y se registra en unidades de tiempo (seg). ....	60
Figura 2.14. Preamplificador empleado.....	62
Figura 3.1. Metodología de la investigación .....	64
Figura 3.2. Patrones de referencia con entallas. ....	66

---

Figura 3.3. Patrones de referencias con indicaciones circulares. ....	67
Figura 3.4. Cálculos geométricos.....	67
Figura 3.5. Componentes del equipo de tiempo de vuelo de difracción.....	68
Figura 3.6. Zapatas piezoeléctricas y palpadores. ....	68
Figura 3.7. Equipo de Ultrasonido. Marca Panametrics Modelo Epoch LT .....	69
Figura 3.8. Osciloscopio digital. Tektronix® TDS210 .....	69
Figura 3.9. Conexión de equipos.....	70
Figura 3.10. Señal visualizada con el osciloscopio digital. ....	74
Figura 3.11. Hoja de cálculo contenida con la matriz de datos. ....	75
Figura 3.12. Matriz procesada en MATLAB® .....	76
Figura 3.13. Imagen del barrido obtenida con MATLAB® .....	76
Figura 3.14 Sección de lámina soldada. ....	78
Figura 3.15. Representación de la elaboración del barrido a la sección de lámina soldada..	79
Figura 3.16. Radiografía de patrón de referencia calibrado. ....	80
Figura 4.1. Señales de osciloscopio de patrones de referencia con entalla .....	83
Figura 4.2. Imagen TOFD de Patrón de referencia H0. ....	84
Figura 4.3. Imagen TOFD de patrón de referencia H1. ....	84
Figura 4.4. Imagen TOFD de patrón de referencia H2. ....	85
Figura 4.5. Imagen TOFD de patrón de referencia H3. ....	85
Figura 4.6. Imagen TOFD de patrón de referencia H4. ....	86
Figura 4.7. Imagen TOFD de patrón de referencia H5. ....	86
Figura 4.8. Imagen TOFD de patrón de referencia H6. ....	87
Figura 4.9. Señal de Osciloscopio de patrones de referencias con indicaciones circulares con separación de zapatas de 14,95 mm. ....	88

---

Figura 4.10. Señal obtenida por el osciloscopio de los patrones de referencia con indicaciones circulares con separación de zapatas de 18,00 mm .....	89
Figura 4.11. Imagen TOFD de patrón de referencia O1.....	90
Figura 4.12. Imagen TOFD de patrón de referencia O2.....	90
Figura 4.13. Imagen TOFD de patrón de referencia O4.....	91
Figura 4.14. Imagen TOFD de patrón de referencia O5.....	91
Figura 4.15. Imagen TOFD de patrón de referencia O6.....	92
Figura 4.16. Imagen TOFD de patrón de referencia O7.....	92
Figura 4.17. Imagen TOFD de patrón de referencia O8.....	93
Figura 4.18. Imagen TOFD de patrón de referencia O9.....	93
Figura 4.19. Imagen TOFD de patrón de referencia O10.....	94
Figura 4.20. Señal de Osciloscopio de sección de lámina soldada con imperfecciones varias con separación de zapatas de 41.30 mm. En la inspección de la imagen TOFD identificada como P1FLAW0 se observó la onda lateral y la señal del eco de fondo bien definidas, con muy buena resolución.....	95
Figura 4.21. Patrón de referencia P1.....	96
Figura 4.22. Imagen TOFD de Patrón de referencia P1.....	96
Figura 4.23. Señal de Osciloscopio de Sección de lámina soldada con imperfecciones varias con separación de zapatas de 27.86 mm.....	97
Figura 4.24. Patrón de referencia P2.....	98
Figura 4.25. Imagen TOFD de Patrón de referencia P2.....	98
Figura 4.26. Señal de Osciloscopio de Sección de lámina soldada con imperfecciones varias con separación de zapatas de 20 mm.....	99
Figura 4.29. Radiografía realizada al patrón de referencia de la sección de lámina soldada.....	101

---

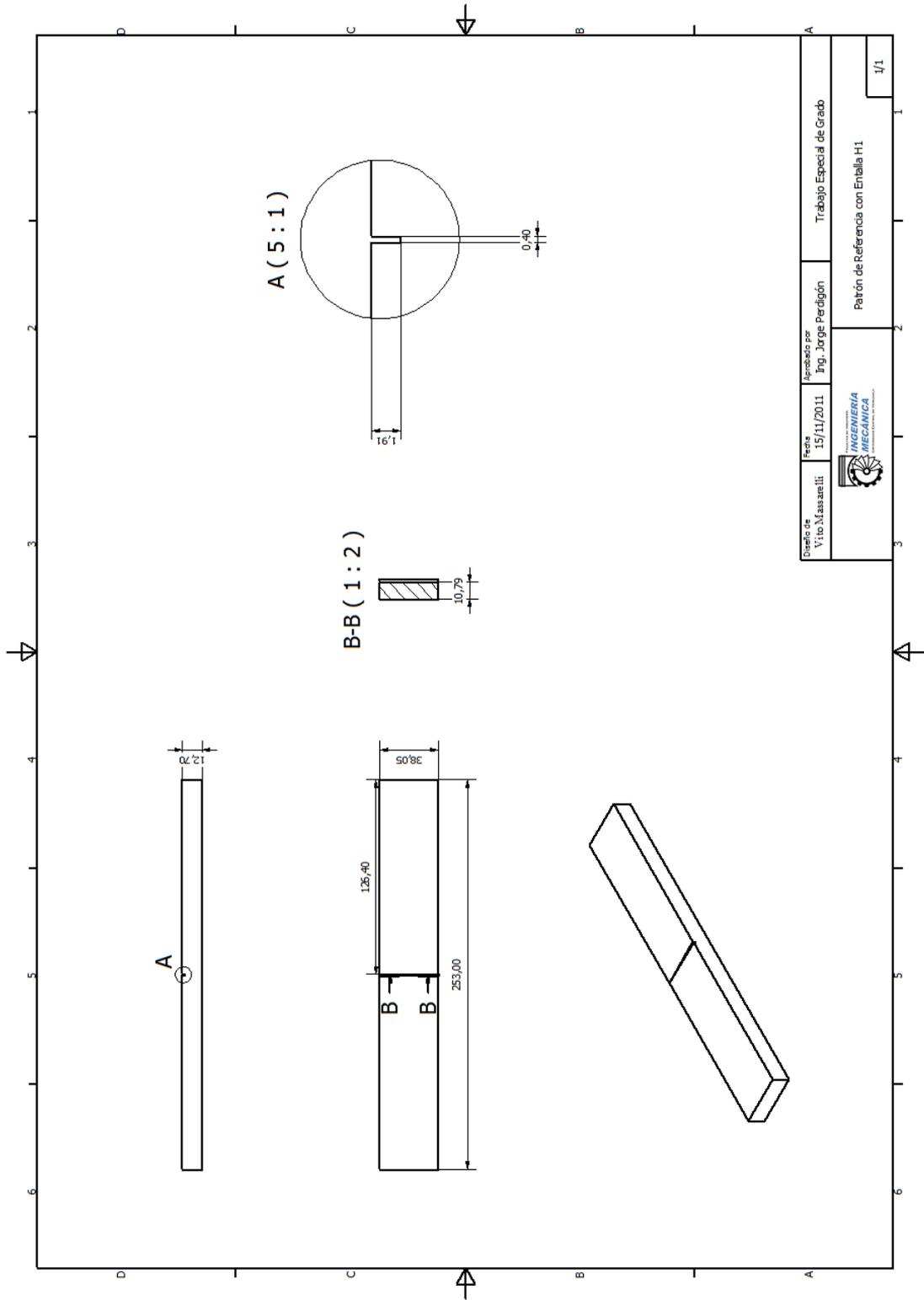
Figura 4.30. Esquema de trayectoria de tiempos de vuelo de la onda lateral. ....	102
Figura 4.31. Esquema de trayectoria de tiempo de vuelos del eco de fondo .....	103

---

## ÍNDICE DE ECUACIONES

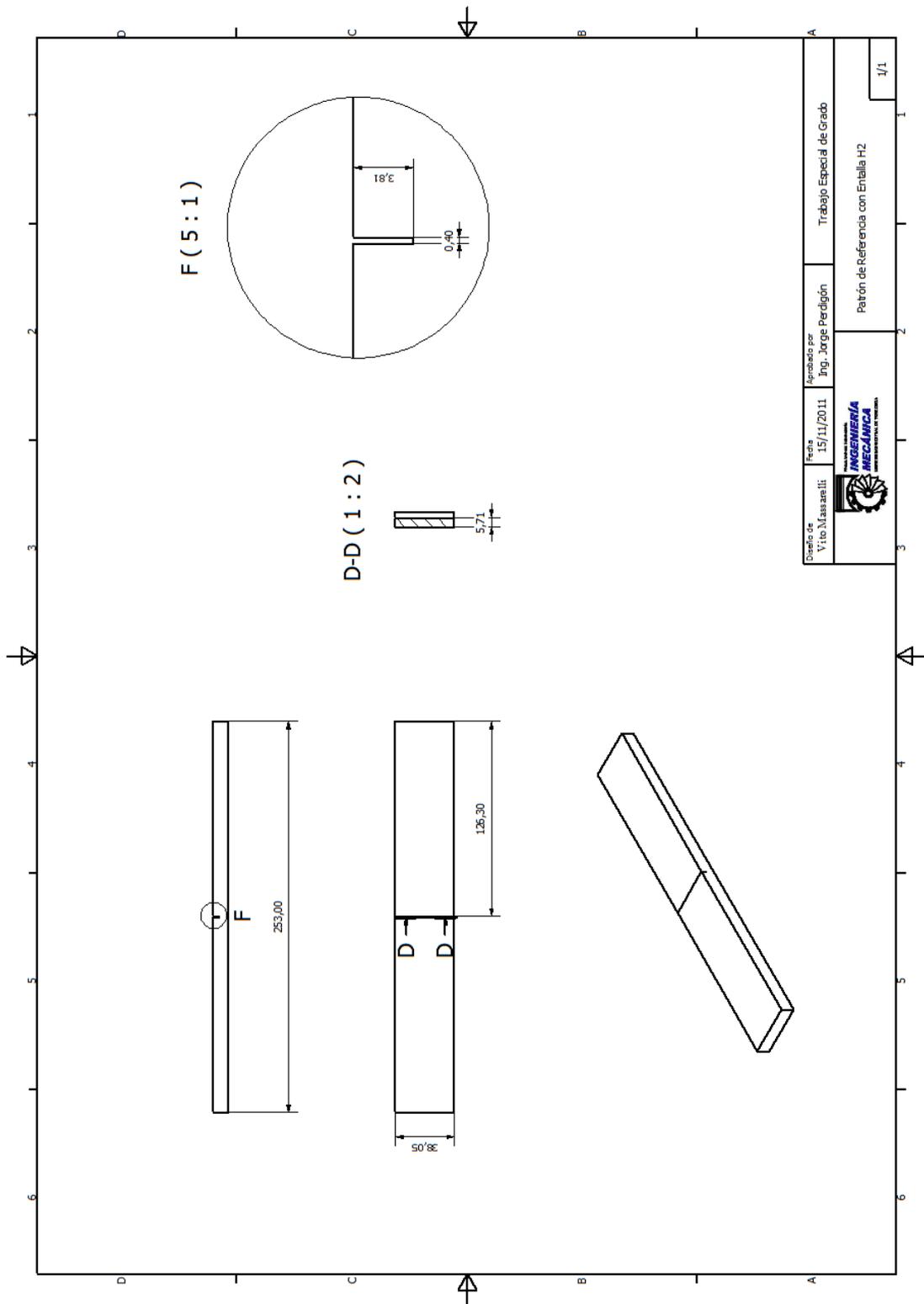
Ecuación 4.1.....	102
Ecuación 4.2.....	102
Ecuación 4.3.....	102
Ecuación 4.4.....	103
Ecuación 4.5.....	103
Ecuación 4.6.....	103
Ecuación 4.7.....	103

# APÉNDICE

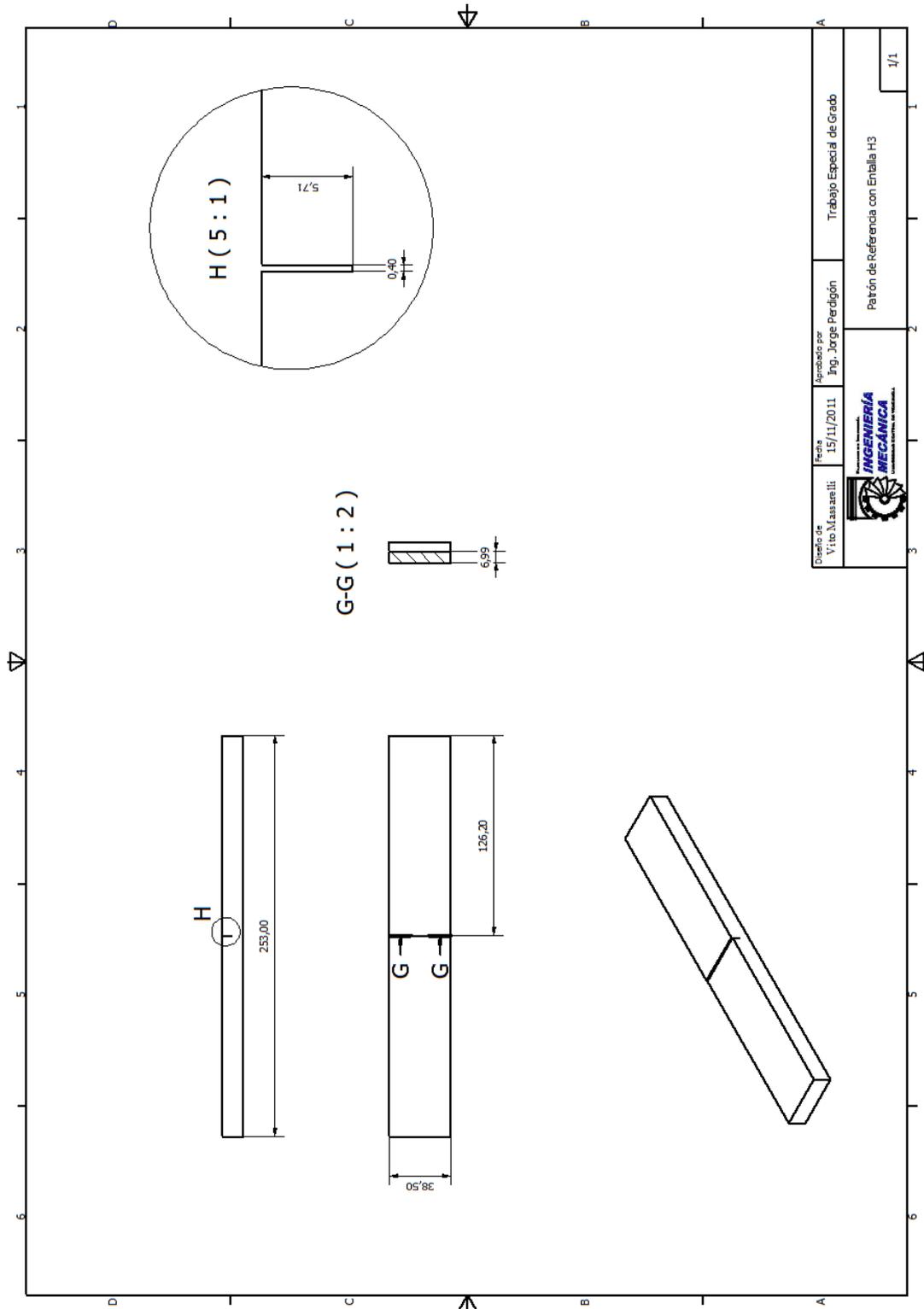


Escuela de Vito Masanesli	Fecha 15/11/2011	Preparado por Ing. Jorge Perdigón	Trabajo Especial de Grado
 INGENIERIA MECÁNICA		Patrón de Referencia con Entalla H1	
		1/1	

Apéndice A1. Patrón de Referencia con Entalla H1.

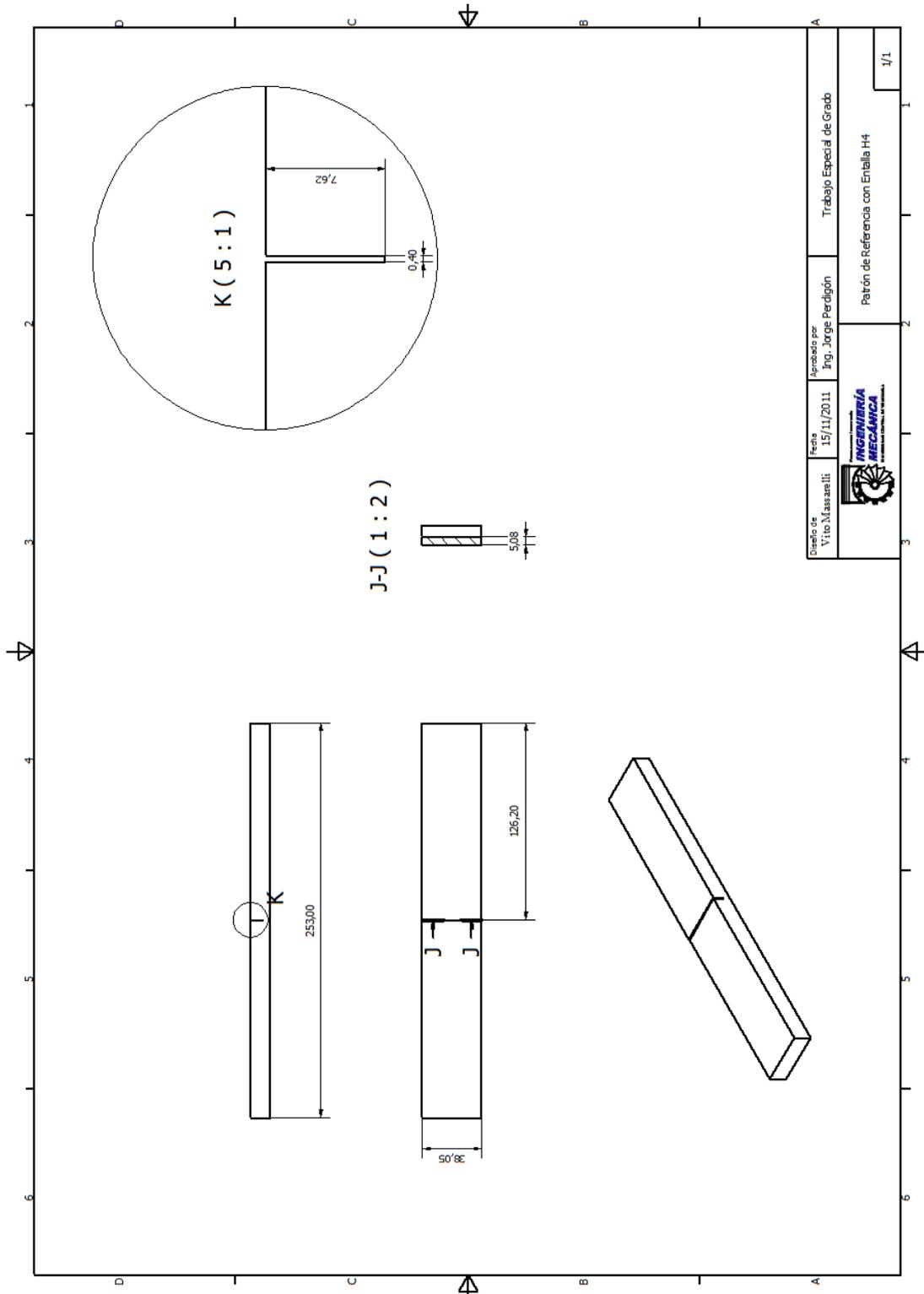


Apéndice A2. Patrón de Referencia con Entalla H2.

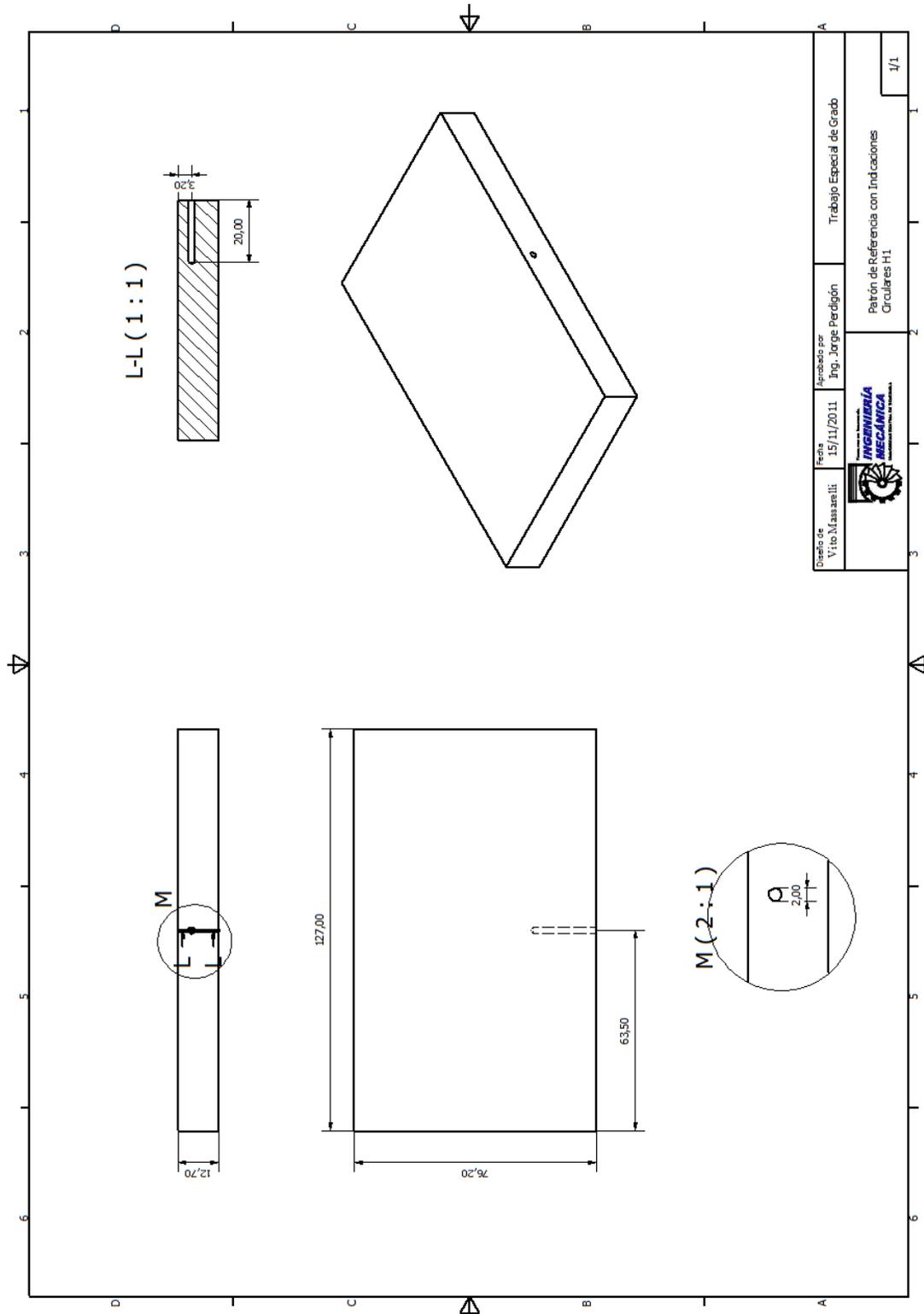


Diseño de Vito Masaneselli	Fecha 15/11/2011	Aprobado por Fig. Jorge Perdigón	Trabajo Especial de Grado
 <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> <small>UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO</small>			Patrón de Referencia con Entalla H3
			1/1

Apéndice A3. Patrón de Referencia con Entalla H3.

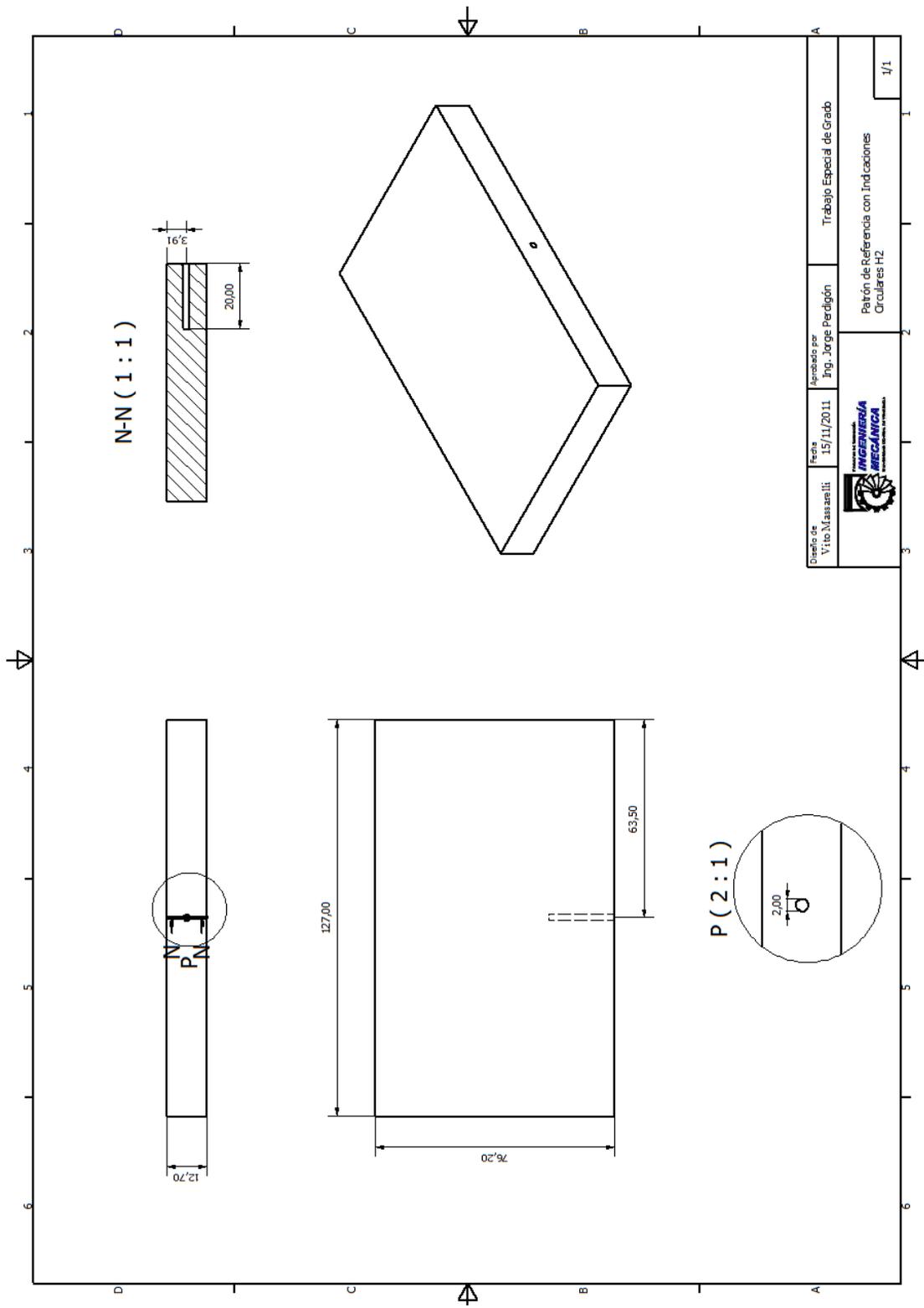


Apéndice A4. Patrón de Referencia con Entalla H4.

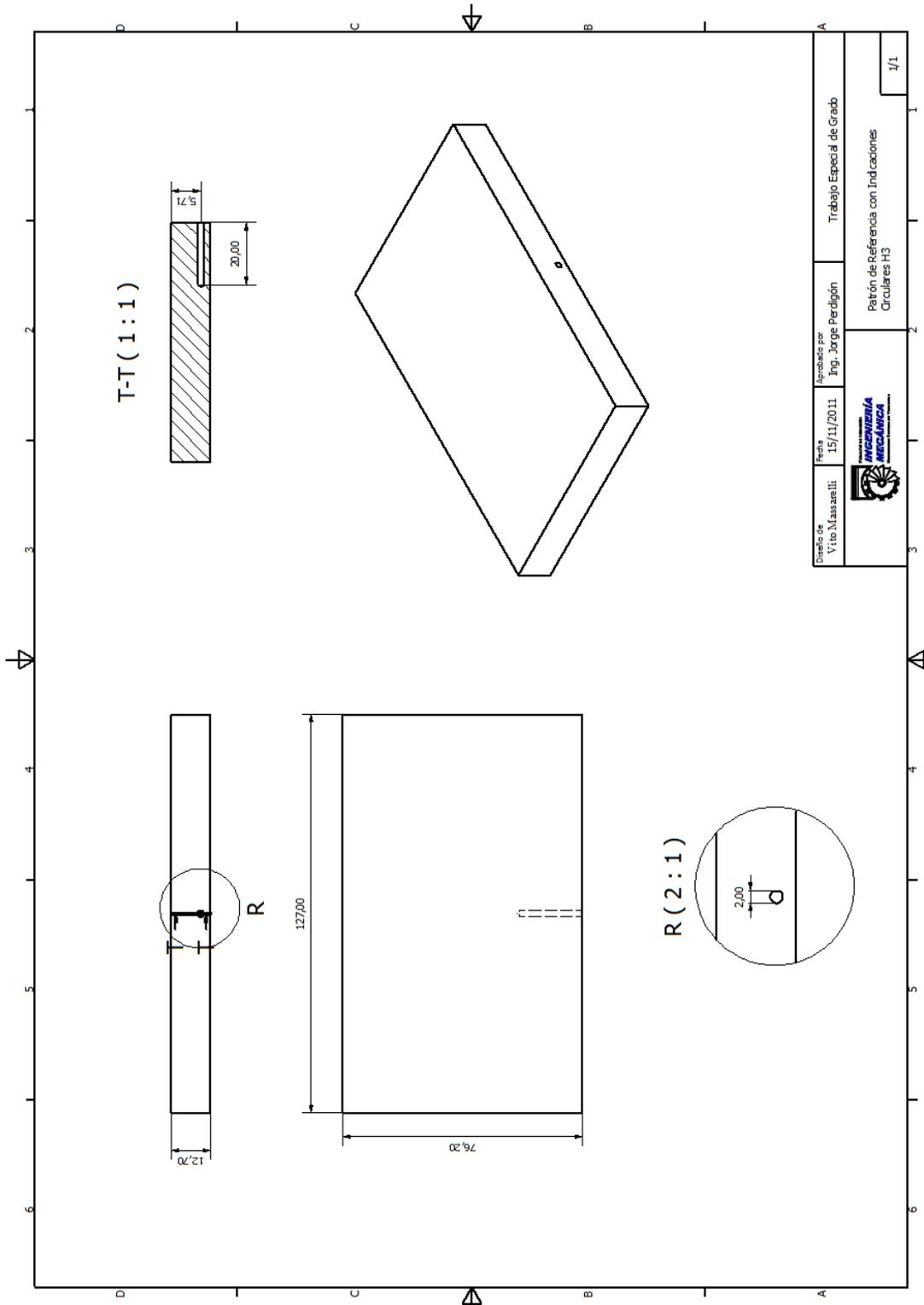


Diseño de Vito Masarelli	Fecha 15/11/2011	Aprobado por Ing. Jorge Perdigón	Título Trabajo Especial de Grad
			Patrón de Referencia con Indicaciones Circulares H1
			1/1

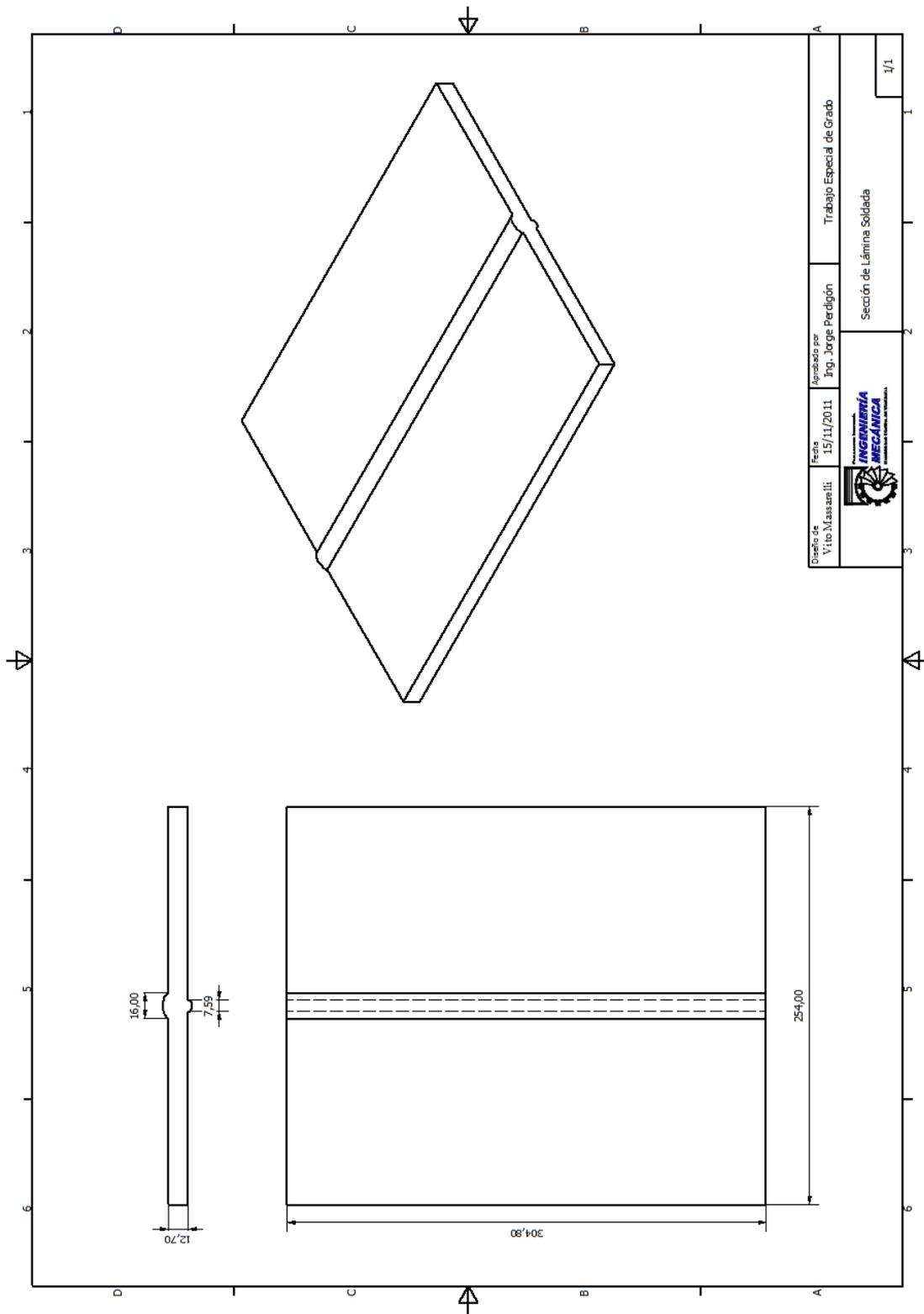
Apéndice A5. Patrón de Referencia con Indicadores Circulares H1.



Apéndice A6. Patrón de Referencia con Indicadores Circulares H2.



Apéndice A6. Patrón de Referencia con Indicadores Circulares H3.



Apéndice A6. Sección de Lámina Soldada.

```

clc; clf; cla; clear;
    t11 = -2e-06;
    t22 = 0.5e-06;
    m0 = 2;
    m = 2500;    %Número de filas    de matriz Z (data)

%Señal 1 P1
load S1H5H0500.txt;
n1 = 20;        %Número de columnas de matriz Z (data)
X1 = S1H5H0500 (1,2:n1+1); nX1 = length(X1); %1era fila Posición a
lo largo de la soldadura o falla generada
t1 = S1H5H0500 (m0:m+1,1    ); nt1 = length(t1); %1era columna
tiempo de vuelo
Z1 = S1H5H0500 (m0:m+1,2:n1+1); nZ1 = length(Z1);
tmin1 = min(t1);
tmax1 = max(t1);
zmin1 = min(Z1);    zmax1 = max(Z1);
Zmin1 = min(zmin1); Zmax1 = max(zmax1);
Zp1 = -0.1*(Zmax1-Zmin1)/Zmin1;

for i = 1:nt1
    XX(i,1:nX1) = X1;
end

for i = 1:nX1
    YY(1:nt1,i) = t1;
end

%Señal 2 P1
load S1H6H0500.txt;
n2 = 20;        %Número de columnas de matriz Z (data)
X2 = S1H6H0500 (1    ,2:n2+1); nX2 = length(X2); %1era fila
Posición a lo largo de la soldadura o falla generada
t2 = S1H6H0500 (m0:m+1,1    ); nt2 = length(t2); %1era columna
tiempo de vuelo
Z2 = S1H6H0500 (m0:m+1,2:n2+1); nZ2 = length(Z2);
tmin2 = min(t2);
tmax2 = max(t2);
zmin2 = min(Z2);    zmax2 = max(Z2);
Zmin2 = min(zmin2); Zmax2 = max(zmax2);
Zp2 = -0.1*(Zmax2-Zmin2)/Zmin2;

for i = 1:nt2
    XX(i,1:nX2) = X2;
end

for i = 1:nX2
    YY(1:nt2,i) = t2;
end

```

```
xmin = 0e-06; xmax = 0.2e-05;
ymin = -1;      ymax = 1;

figure (1)
subplot(5,1,1)
plot(t1,Z1)
axis([-3.5E-06 -1.6E-06 -0.5 0.5])
subplot(5,1,2)
plot(t2,Z2)
axis([-3.55E-06 -1.6E-06 -0.5 0.5])

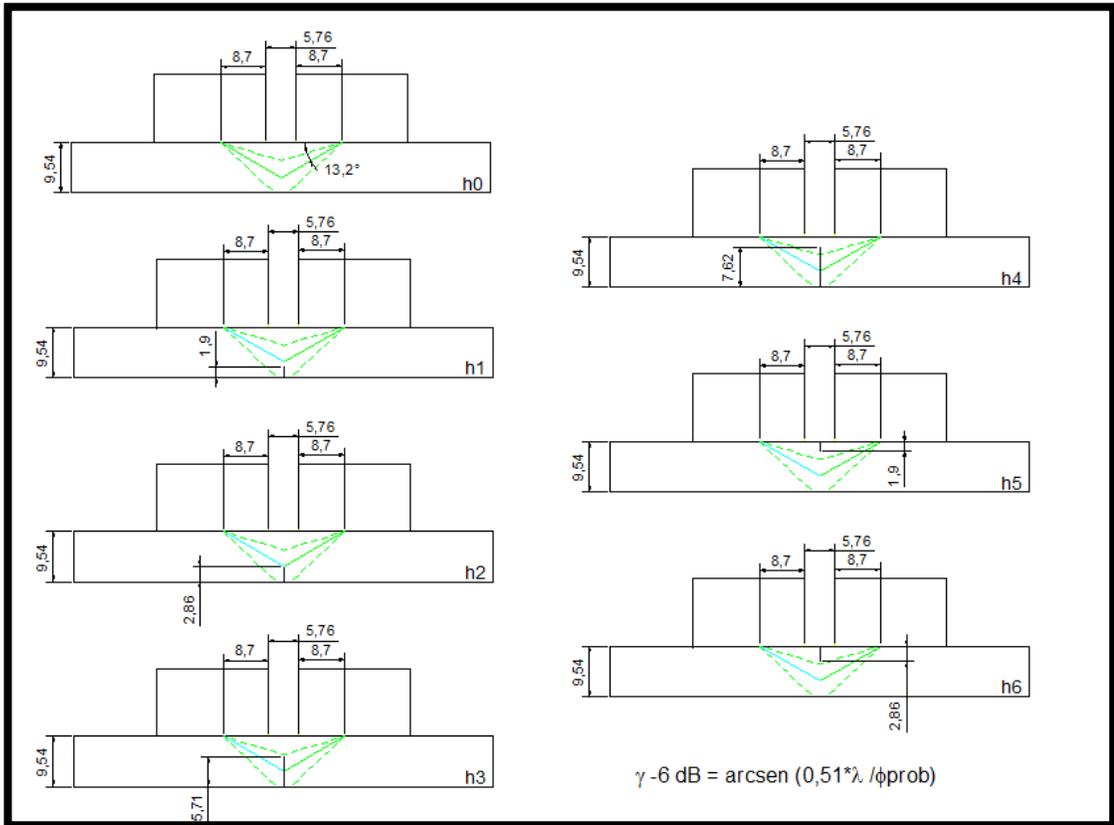
az = -30;
el = 20;

I1 = 5*0.000001763;
T1 = t1 + I1;
T2 = t2 + I1;

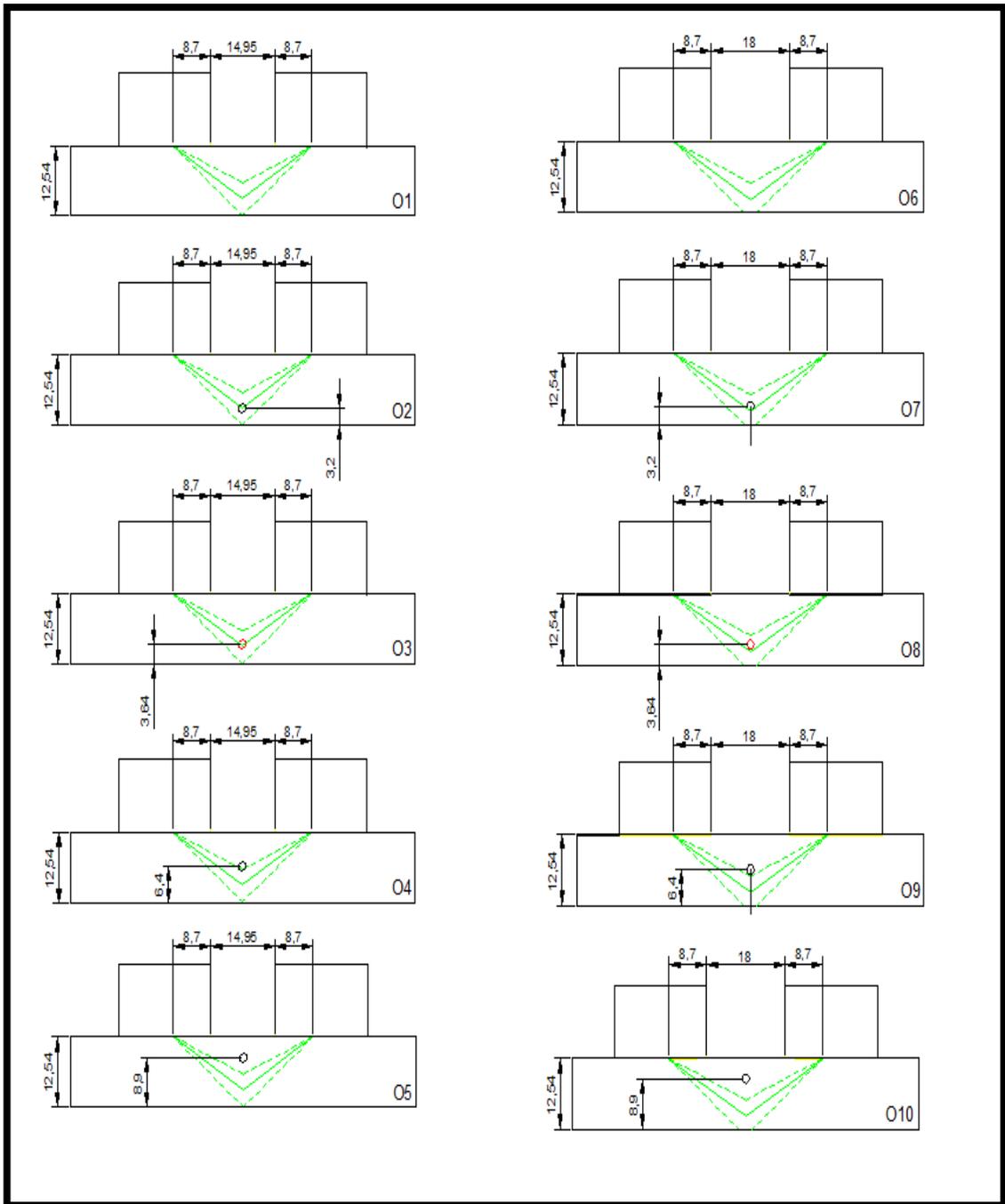
figure (5)
subplot(5,1,1)
plot(T1,Z1)
axis([-0.5E-6 8E-06 -1 1])
subplot(5,1,2)
plot(T2,Z2)
axis([-0.5E-6 8E-06 -1 1])

figure (6)
subplot(5,1,1)
plot(T1,Z1)
axis([0E-6 8E-06 -1.25 1.25])
subplot(5,1,2)
plot(T2,Z2)
axis([0E-6 8E-06 -1.25 1.25])
```

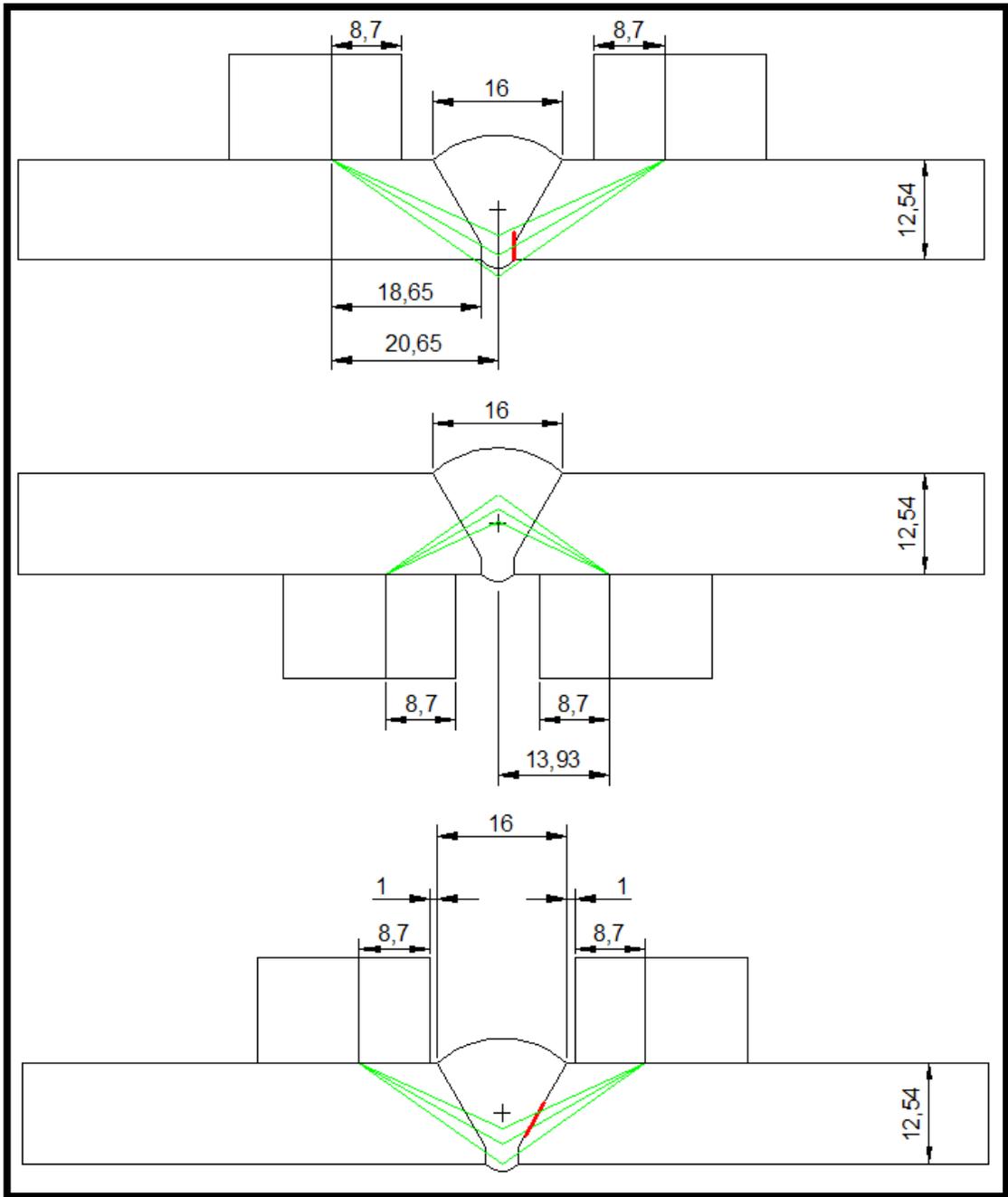
Apéndice A7. Algoritmo de generación de imágenes TOFD.



Apéndice A8. Patrones de referencia con entallas.



Apéndice A9 Patrones de referencia con indicaciones circulares.



Apéndice A10. Patrones de referencia, sección de lamina soldada.