

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE ULTRASONIDO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres

Grandi P, Olga D

Behar Q, David E

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE ULTRASONIDO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Jorge Perdigón

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres

Grandi P, Olga D

Behar Q, David E

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

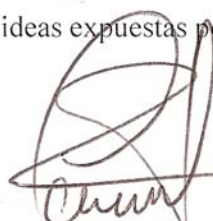
Caracas, Noviembre, 2008.

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres **Olga Grandi** y **David Behar**, intitulado

“Evaluación de Soldaduras Mediante Ultrasonido”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos en el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores.



Prof. Crisanto Villalobos
Jurado





Prof. (a) María de los A. Rodríguez
Jurado



Prof. Jorge Perdigón
Tutor Académico

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres y amigos que nos motivaron y nos dieron todo su apoyo para culminar este trabajo.

Al Ing. Jorge Perdigon por darnos la oportunidad de trabajar con él, por su inmensa paciencia e innumerables conocimientos transmitidos.

A los Profesores Pereira, Chiti y Cuartin por compartir sus espacios de trabajo, sus equipos y sus conocimientos con nosotros.

RESUMEN

Grandi P, Olga D

Behar Q, David E

EVALUACIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE ULTRASONIDO.

Tutor Académico: Prof. Jorge Perdigón

Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Mecánica. Año 2008. 103 páginas.

Soldadura, ensayos no destructivos, radiología industrial, ultrasonido industrial, transformada de Fourier.

El presente trabajo consistió en realizar ensayos de radiología y ultrasonido industrial en probetas formadas por secciones de láminas de acero ASTM A36 unidas por la técnica de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido, con la finalidad de conocer los patrones de las señales ultrasónicas al contrastarlos con las placas radiográficas y así identificar las discontinuidades presentes en un cordón de soldadura.

A las señales provenientes de las indicaciones ultrasónicas se les hizo un procesamiento y se les aplicó la transformada de Fourier por medio de un programa computacional, arrojando éste ciertos patrones con respecto a las formas de las curvas y a los valores de sus picos máximos, con lo que se concluyó que las indicaciones ultrasónicas provenientes de discontinuidades (poros y falta de penetración) se pueden caracterizar tanto por la forma de las señales como por la respuesta de la transformada de Fourier.

Los valores de los picos máximos en las gráficas de la transformada de Fourier para las faltas de fusión se ubicaron entre 4,78 y 16,97 Volt, los valores de los poros se encontraron entre 3,70 y 6,98 Volt, y los valores de escoria entre 5,44; 36,95 Volt.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	3
Fundamentos de la investigación	3
1.1. Planteamiento del Problema	4
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
CAPÍTULO II	7
Marco Teórico	7
2.1. Proceso de soldadura eléctrica al arco con electrodo revestido	8
2.2. Discontinuidades	8
2.2.1. Discontinuidades encontradas en uniones soldadas	9
2.3. Ensayos mecánicos en los materiales	10
2.4. Ensayos no destructivos	11
2.4.1. Objetivos de los END	12
2.4.2. Aplicaciones de los END	12
2.4.2.1. Métodos y técnicas de inspección	14
2.4.3.1. Radiología Industrial	14
2.4.3.2. Ultrasonido industrial	20
2.5. Procesamiento de Señales	36
2.5.1. Clasificación de las señales	37

2.6. Análisis frecuencial de señales.	38
CAPITULO III	40
Marco Metodológico	40
3. Marco Metodológico	41
3.1. Equipos e instrumentos utilizados.....	42
3.2. Descripción del material base	42
3.3. Proceso de soldadura.....	44
3.4. Ensayo de radiografía industrial	45
3.5. Interpretación de placas radiográficas	46
3.6. Ensayo de ultrasonido industrial.....	46
3.7. Procesamiento de señales ultrasónicas	52
3.8. Diseño del programa.	54
CAPITULO IV	56
Resultados y Análisis de Resultados	56
3.9. Soldadura en probetas por arco eléctrico	57
3.10. Resultados de Ensayo de radiografía industrial	57
3.11. Resultados del ensayo no destructivo de ultrasonido industrial y procesamiento de señales.....	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXO	89
APÉNDICE	95

TABLAS

Tabla 1: Principales defectos de la soldadura.....	19
Tabla 2: Dimensión de las probetas	43

FIGURAS

Figura 1. Características de las Ondas de Superficie	24
Figura 2. Características de las Ondas de Lamb	24
Figura 3. Corte de un transductor	26
Figura 4. Geometría del haz para un transductor con un ángulo de divergencia de 15°	27
Figura 5.....	29
Figura 6.....	30
Figura 7. Diagrama del haz ultrasónico mostrando las diferentes zonas de intensidad.....	32
Figura 8. Esquema representativo del procedimiento.....	41
experimental.	41
Figura 9. Configuración de placas biseladas para soldadura	44
Figura 10. Determinación del punto de salida del eje del haz.	47
Figura 11. Determinación del ángulo real del transductor.....	47
Figura 12. Bloque patrón de calibración básica.	49
Figura 13. Recorrido del eco ultrasónico desde la salida del transductor hasta la base y alto del refuerzo de la soldadura.....	50
Figura 14. Bloque de calibración ASME I.I.W. V-1	51
Figura 15: Señal B60V6-1	62
Figura 16: Señal número 1 de la probeta A, presentada en radiofrecuencia y en el modo A-Scan	64
Figura 17: Gráficas de discontinuidad N° 2, vista 3 en la probeta B. ...	65
Figura 18: Gráficas de discontinuidad N° 6 vista 1 en la probeta B.	66
Figura 19: Gráficas de discontinuidad N° 6 vista 2 en la probeta B.	66
Figura 20: Gráficas de discontinuidad N° 6 vista 4 en la probeta B.	67

Figura 21: Gráficas de discontinuidad N° 6 vista 5 en la probeta B.	67
Figura 22: Gráficas de discontinuidad N° 2 vista 2 en la probeta A.	68
Figura 23: Gráficas de discontinuidad N° 2 vista 3 en la probeta A.	68
Figura 24: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 1 en la probeta A.	69
Figura 25: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 3 en la probeta A.	69
Figura 26: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 5 en la probeta B.	70
Figura 27: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 4 en la probeta B.	70
Figura 28: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 2 en la probeta B.	71
Figura 29: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 1 en la probeta B.	71
Figura 30: Gráficas de discontinuidad N° 5 vista 6 en la probeta B.	72
Figura 31: Gráficas de discontinuidad N° 5 vista 4 en la probeta B.	72
Figura 32: Gráficas de discontinuidad N° 5 vista 3 en la probeta B.	73
Figura 33: Gráficas de discontinuidad N° 5 vista 1 en la probeta B.	73
Figura 34: Gráficas de discontinuidad N° 4 vista 5 en la probeta A.	74
Figura 35: Gráficas de discontinuidad N° 4 vista 3 en la probeta A.	74
Figura 36: Gráficas de discontinuidad N° 4 vista 1 en la probeta A.	75
Figura 37. Representación esquemática de la incidencia del haz ultrasónico sobre un poro	77
Figura 38. Cordones de soldadura de baja calidad, resultado de fusión incompleta	96
Figura 39. Tipos de grietas en uniones soldadas, debidas a esfuerzos térmicos que se desarrollan durante la solidificación y la contracción del cordón de soldadura y la estructura que la rodea. (a) Grietas de cráter. (b) Varios tipos de grietas en uniones a tope y en T	96
Figura 40. Espectro de Acústico.....	96
Figura 41. Características de las Ondas Longitudinales	96
Figura 42. Características de las Ondas Transversales	96

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen estudios con la finalidad de analizar interrupciones en la continuidad en uniones soldadas en aleaciones de acero al carbono mediante diversas técnicas entre las cuales se puede mencionar ensayos destructivos como tracción uniaxial, dobléz, Charpy entre otros y ensayos no destructivos los cuales se caracterizan por la no alteración físico-química de los materiales analizados.

La aplicación de ensayos destructivos por su naturaleza destructiva se aplica bajo criterios de muestreos ya que implican la interrupción del servicio y destrucción de los componentes.

Con la finalidad de evaluar evitando la alteración de la continuidad de los materiales y uniones soldadas bajo estudio se aplicarán técnicas no destructivas.

Existen diversas técnicas no destructivas como evaluación visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes inducidas, emisión acústica, radiografía industrial, ultrasonido industrial, entre otras. Las dos últimas técnicas antes mencionadas permiten la evaluación de discontinuidades volumétrica y planares, tanto en la superficie como en el interior de los materiales.

La técnica no destructiva de radiografía industrial anteriormente se presentaba como la única técnica convencional en la que la

interpretación de los datos dejaba un registro permanente, sin embargo esta técnica constituye un factor de riesgo para quienes trabajan con ellos, debido a la emisión de ondas ionizantes, adicionalmente presentan la incomodidad de transporte y manejo de equipos pesados por el blindaje de protección de las fuentes de radiación.

En la actualidad la técnica de ultrasonido industrial presenta interpretaciones de datos los cuales se pueden almacenar permanentemente, sin los riesgos asociados a la emisión de ondas ionizantes. Así mismo, suele ser empleado para la evaluación del daño en acero y sus juntas soldadas, siendo esta de fácil aplicación en el campo y de bajo a mediano costo. Por estas razones el ultrasonido industrial es una metodología que actualmente tiende a desplazar a la técnica de radiología industrial.

Motivado a las características de análisis por ultrasonido, se desarrolló una metodología con la finalidad de identificar discontinuidades planares y volumétricas, estudiando la ecodinámica de las indicaciones ultrasónicas provenientes de discontinuidades en juntas soldadas de aceros al carbono y contrastándolas con las indicaciones observadas en películas radiográficas de las mismas piezas.

CAPITULO I

Fundamentos de la investigación

1.1. Planteamiento del Problema

En la industria metalmecánica donde se requieran componentes de acero y otras aleaciones las cuales se unen mediante la aplicación de soldadura, en especial la industria petrolera y de hidrocarburos, es necesario realizar evaluaciones sistemáticas de estos componentes durante los períodos de construcción, puesta en marcha, servicio y durante las paradas de mantenimientos con la finalidad de identificar y evaluar que daños se producen y su efecto en la integridad estructural de los componentes.

Tomando en cuenta que los ensayos no destructivos mediante la aplicación de la técnica de ultrasonido industrial, son convenientes para la evaluación de discontinuidades volumétricas y planares y que las señales-respuestas emitidas por las mismas aún están en estudio, se fabricarán uniones soldadas que presenten imperfecciones tipo y se realizará un estudio de estas, empleando dicho ensayo para posteriormente realizar un programa computarizado que tome las señal que devuelve el ultrasonido y la traduzca en una señal con la cual se busca una característica de esta discontinuidad.

Se propone evaluar probetas de acero soldadas con discontinuidades conocidas mediante un ensayo de radiografía industrial, posteriormente se compararán los resultados obtenidos por este ensayo con las señales emitidas por el ultrasonido; según el tipo de discontinuidad que

representen. Luego se procederá a evaluar las señales obtenidas por ultrasonido aplicando técnicas computacionales.

1.2. Objetivos

1.2.1.Objetivo general

Evaluar discontinuidades en juntas soldadas de acero mediante la técnica no destructiva de ultrasonido industrial.

1.2.2. Objetivos específicos

- Fabricar patrones de referencia de juntas soldadas en secciones de láminas de acero al carbono con discontinuidades planares y volumétricas.
- Realizar placas radiográficas sobre los patrones de referencias.
- Interpretar las placas radiográficas de los patrones de referencia.
- Realizar ensayos de ultrasonido industrial sobre los patrones de referencias.
- Contrastar los resultados obtenidos mediante la técnica no destructiva de radiografía y ultrasonido industrial.
- Evaluar las señales respuestas obtenidas por la técnica de ultrasonido industrial mediante técnicas computacionales.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1. Proceso de soldadura eléctrica al arco con electrodo revestido

La soldadura eléctrica al arco con electrodo revestido es el proceso en el que la energía se obtiene por medio del calor producido por un arco eléctrico que se forma en el espacio comprendido entre la pieza a soldar y una varilla que sirve como electrodo, este se enciende cortocircuitando el electrodo con la pieza a soldar. Por lo general, el electrodo también provee el material de aporte, el cual con el calor producido por el arco eléctrico se funde, depositándose entre las piezas a unir. La temperatura que se genera en este proceso es superior a los 5500 °C. ⁽¹⁾

La corriente que se emplea en este sistema puede ser continua o alterna, utilizándose en los mejores trabajos la de tipo continua, debido a que la energía es constante, con la que se puede generar un arco más estable. La corriente alterna permite efectuar operaciones de soldadura con el objeto de trabajo en posición horizontal y preferentemente en materiales ferrosos, mientras que la corriente continua no presenta esas limitaciones de posición y material. ^(1, 2)

2.2. Discontinuidades

En un material, una discontinuidad puede ser definida como la interrupción en su estructura normal. ⁽³⁾ Y un defecto como una discontinuidad o suma de discontinuidades que hace de una pieza o componente inaceptable en el cumplimiento de un requisito mínimo aceptable conforme a una norma o especificación ⁽⁴⁾.

Las discontinuidades se pueden clasificar:

Según su forma:

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

Según su ubicación:

- Superficiales.
- Internas.

Según su proceso de producción:

- Natos o inherentes: generadas durante la constitución de los materiales.
- De procesamiento: generados durante el procesamiento de los materiales para obtener productos semi-terminados o acabados.
- De servicios: generados durante la operación.

2.2.1. Discontinuidades encontradas en uniones soldadas

Una unión soldada puede desarrollar diversas discontinuidades como resultado de una historia de ciclos térmicos y los cambios micro estructurales correspondientes. También se puede deber a una aplicación inadecuada de las tecnologías establecidas, o por la capacitación deficiente del operador.⁽¹⁹⁾ Algunas de las discontinuidades que afectan la calidad de la soldadura son: porosidad, inclusión de

escoria, falta de fusión, penetración incompleta, sopladura, picadura, rechupe, perforación, mordedura, socavamiento, falta de alineación, salpicadura ó exceso de material, grieta, daño superficial, esfuerzo residual.

2.3. Ensayos mecánicos en los materiales

Los ensayos mecánicos son procedimientos normalizados con los que es posible cuantificar las diferentes propiedades de los materiales, tales como: cohesión, ductilidad, dureza, elasticidad, fatiga, fragilidad, maleabilidad, plasticidad y resiliencia.

Los diferentes ensayos se pueden clasificar según la utilidad de la pieza después de ser sometida al ensayo en “ensayos destructivos” y “ensayos no destructivos (END)”

Los ensayos destructivos permiten determinar cuantitativamente ciertas propiedades de los materiales, como la resistencia mecánica, fragilidad, dureza, maleabilidad, entre otros. La ejecución de los ensayos destructivos requiere el deterioro significativo o hasta la destrucción de la muestra que, en general, queda inutilizable.

En cualquiera de los ensayos destructivos, la toma de muestra implica un daño irreparable para el objeto ensayado. En estos ensayos, aplicados a un control de calidad estadístico permiten, comprobar con un cierto margen de seguridad, el nivel de calidad de una producción,

obteniendo en general datos de una muestra de la misma, pero no de todo su volumen, sin poder asegurar la calidad de todos los elementos de un lote.

Entre los ensayos destructivos podemos nombrar el ensayo de dureza, el ensayo de tracción, ensayo de resiliencia entre otros.

2.4. Ensayos no destructivos

Los END reúnen una serie de métodos que permiten obtener información sobre propiedades, condiciones y estructuras de un material, adaptándose a las exigencias de la muestra y evitando así su deterioro. Para ello hay que recurrir al estudio de otras propiedades del material, tales como: densidad, índice de refracción, absorbancia electromagnética, estructura cristalina, conductividad térmica, entre otros. Aplicando fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique alteración físico y/o químico del material bajo estudio.

Este tipo de ensayo permite la inspección del 100% de una producción y la obtención de datos de todo el volumen de un producto o pieza de esta manera, contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme.

En general los END proveen datos menos exactos acerca del estado de la variable a medir que los ensayos destructivos. Sin embargo, suelen

ser más económicos para el propietario de la pieza a examinar, ya que no implican la destrucción de la misma.

Cuando se aplican los END no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de la pieza, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Por lo que estas pruebas no sustituyen a los ensayos destructivos, sino que más bien los complementan. ⁽³⁾

2.4.1. Objetivos de los END

Los END tienen como objetivo detectar las discontinuidades en materiales y estructuras sin destrucción de los mismos; determinar la ubicación, orientación, forma, tamaño y tipo de discontinuidades y establecer la calidad del material, basándose en el estudio de los resultados y en la severidad de las discontinuidades y/o defectos de acuerdo a las normas de calidad y los objetivos de diseño.

2.4.2. Aplicaciones de los END

Los métodos de ensayos no destructivos tienen un amplio campo de aplicaciones que pueden ser resumidas en tres grupos:

- Defectología: Permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales, determinación de estados de esfuerzo; detección de fugas.
- Caracterización: Evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales; propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas), transferencias de calor y trazado de isotermas.
- Metrología: Control de espesores, medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimiento, niveles de llenado.

Los END constituyen una herramienta imprescindible en el mantenimiento, control y aseguramiento de la calidad, ya que con ellos se pueden inspeccionar productos soldados, fundidos, forjados, laminados, en casi cualquier material.

Los ensayos no destructivos se utilizan gran gama de actividades industriales:

- Industria aeronáutica
- Industria eléctrica
- Industria siderúrgica
- Industria de comunicaciones y transportes
- Industria petroquímica
- Industria naval
- Industria metalmecánica

- Industria química
- Industria automotriz

2.4.2.1. Métodos y técnicas de inspección

De acuerdo con su aplicación, los END se dividen en:

- Técnicas de inspección superficial.
- Técnicas de inspección volumétrica.

Como su nombre lo indica, las técnicas de inspección superficial solo se utilizan para comprobar la integridad superficial de un material, para detectar discontinuidades en la superficie, abiertas a esta o a profundidades menores a 3 mm ⁽³⁾

Algunos ejemplos de técnicas de inspección superficial son: "líquidos penetrantes", "partículas magnéticas", "electromagnetismo" e "inspección visual".

Las técnicas de inspección volumétrica proporcionan el conocimiento de la integridad de un material en su espesor y detecta discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza. ⁽³⁾

Este tipo de inspección se puede realizar mediante ensayos de "radiología neutrónica", "emisión acústica", "radiología industrial" y "ultrasonido industrial".

2.4.3.1. Radiología Industrial

Se define radiología como la ciencia cuyo referencial son las radiaciones. La radiología solo hace referencia a aquellos conocimientos relacionados con las radiaciones electromagnéticas cuyos fotones son más energéticos que los ultravioletas. Se consideran que son objetos de la radiología, aquellas radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda es inferior a $100 \text{ \AA}$, ó 10 nm ⁽⁵⁾

La inspección por radiología se define como un procedimiento de inspección no destructivo del tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o configuración física de un material. ⁽³⁾

En la actualidad, dentro del campo de la industria existen dos técnicas comúnmente empleadas para la inspección radiológica: radiología con rayos X y radiología con rayos gamma. La principal diferencia entre estas dos técnicas es el origen de la radiación electromagnética; ya que, mientras los rayos X son generados por un alto potencial eléctrico(dispositivos electrónicos), los rayos gamma se producen por desintegración atómica espontánea de un radioisótopo (fuentes radioactivas naturales ó por isótopos radioactivos artificiales).

Aplicaciones de la Radiología Industrial

- Donde se emplea la energía radiante y su efecto sobre la materia, como es el caso de las aplicaciones físicas (efectos de fluorescencia), médicas (destrucción de ciertas células) y biológicas (mutaciones o aplicaciones de esterilización biológica).

- Donde se emplean los efectos físicos, como son la difracción (determinación de estructuras cristalográficas), fluorescencia (determinación de composición química) y la ionización (detección de la radiación), entre otros.
- Donde se mide la atenuación de la radiación, como es el caso de la medición de espesores en procesos de alta temperatura; la medición de niveles de fluidos; la determinación de densidades en procesos de producción continua y la radiología industrial.

Ventajas de la radiología industrial

- Eficaz medio de registro de inspección.
- Se puede utilizar en diversos materiales.
- Proporciona una imagen visual del interior del material.
- Proporciona un registro permanente de la inspección.
- Encuentra las fallas de fabricación y ayuda a establecer las acciones correctivas.

Limitaciones de la radiología industrial

- No es recomendable su uso en piezas de geometría complicada.
- La pieza a inspeccionar debe tener por lo menos dos vías de acceso.
- Su uso requiere personal altamente capacitado y con experiencia.

- Requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad.

Riesgos y medidas de seguridad en la radiología industrial

Después del descubrimiento de los rayos X y la radiactividad, hubo pruebas de que la exposición del cuerpo humano a las radiaciones era nociva. A partir de estas pruebas, la acción de las radiaciones sobre los tejidos y las infraestructuras biológicas ha sido objeto de numerosos estudios. ⁽⁵⁾

Algunos de los riesgos de la radiología son:

Irradiación aguda: es producida por una sobredosis general o local capaz de producir síntomas y daños específicos y objetivos en el sujeto que la ha sufrido. ⁽⁵⁾

Irradiación crónica: es producida por acumulación excesiva de dosis a lo largo del tiempo. Por lo general no da lugar a síntomas específicos sino a enfermedades que podrían afectar también a sujetos no irradiados, pero que se presentan con mayor frecuencia en quienes han soportado habitualmente dosis significativas de radiación, aunque incapaces de producir síndrome de irradiación aguda. ⁽⁵⁾

Efectos estocásticos: son aquellos efectos cuya relación causal con la radiación solo puede establecerse por medios estadísticos. Así como la aparición de ciertas enfermedades inespecíficas con mayor frecuencia

entre sujetos irradiados o la incidencia negativa en el fondo genético de una población. Contrariamente los efectos “no estocásticos” presentan una clara relación causal y suelen manifestar síntomas específicos los cuales por lo general van ligados a lo que se ha llamado “irradiación aguda”. ⁽⁵⁾

Medidas generales de seguridad: La protección frente a las radiaciones ionizantes depende, especialmente, de tres factores: distancia, tiempo y blindaje.

- Distancia: Tanto más alejados nos encontremos de la frecuencia de radiación menor será el riesgo.
- Tiempo: En general los tiempos de exposición a la radiación deben ser los menores posibles, ya que la dosis acumulada crece en razón directa al tiempo de exposición.
- Blindaje: Cuando la radiación atraviesa un medio distinto del vacío, su efecto se atenúa tanto más intensamente cuanto más absorbente y grueso sea el medio.

Interpretación de placas radiográficas

Ateniéndose a la clasificación vigente establecida por la Norma Europea EN 26520/91, algunas de las discontinuidades que pueden afectar a las uniones soldadas se explican en la siguiente tabla, pormenorizando los aspectos metalúrgicos y radiográficos. ⁽⁵⁾

Tabla 1: Principales defectos de la soldadura

Designación	Descripción radiográfica
Grieta	Línea oscura, recta o sinuosa, generalmente con una fina textura longitudinal como de gasa plegada que se manifiesta sobre todo en los extremos
Sopladura	Indicación oscura circular, elíptica alargada de tamaño variable, desde 4 o 5 milímetros al límite de visibilidad.
Poros	Indicación oscura sensiblemente circular
Picadura	Indicaciones oscuras, sensiblemente circulares, que se distribuyen al azar, más o menos uniformemente por la imagen del cordón. Puede ser de tamaño aproximadamente uniforme o surtidas.
Rechupe	Indicación oscura irregular generalmente asociada a sobre espesores en la raíz o principio del cordón.
Inclusión de escoria	Imágenes oscuras bien definidas de forma más o menos suaves, redondeadas o alargadas. Ocasionalmente de formas irregulares y esquinadas. Es característica su presentación en líneas paralelas.
Falta de Fusión	Líneas oscuras poco contrastadas, frecuentemente con un borde limpio y el otro irregular o difuso. Las que se forman en la raíz se detectan con seguridad, las de borde con dificultad y las que existen entre pasadas por intuición, a partir de otras discontinuidades asociadas, por ejemplo: líneas de poros fino.
Falta de penetración	Línea oscura bien contrastada y definida en la raíz.

Mordedura		Líneas o puntos irregulares oscuros a los lados de la imagen del cordón.
Falta alineación.	de	Cuando es intensa, la imagen presenta una especie de montadura de los bordes del cordón.
Perforación		Imágenes muy oscuras irregulares, asociadas a fuertes irregularidades del cordón.
Salpicaduras excesos material	o de	Imágenes claras circulares generalmente en el metal base.

Fuente: (5)

2.4.3.2. Ultrasonido industrial

Los ultrasonidos son ondas acústicas de la misma naturaleza que las ondas sónicas, se diferencian de estas en que su campo de frecuencias se encuentra por encima de la zona audible. ⁽⁵⁾

Debido a los fenómenos que provocan en su propagación a través de los sólidos, líquidos y gases han dado lugar a la aparición de diversas aplicaciones técnicas y científicas. ⁽⁵⁾

Todas estas aplicaciones pueden ser agrupadas en dos áreas:

1. Las que explotan la energía acústica, utilizando elevados niveles de energía.
2. Las que explotan la energía acústica sólo como portadora de señal, lo que por lo general, va a asociado a bajos niveles de energía.

En este segundo grupo es posible ubicar a la técnica de ensayos no destructivos de los materiales ultrasonido industrial. Esta técnica es aplicada para inspeccionar la estructura de un material, procesando la trayectoria de la propagación de las ondas en el interior de este, para ello se emplean haces de ondas acústicas de alta frecuencia (comúnmente entre 1 y 25 MHz), que se propagan a través del material y se reflejan, difractan y atenúan; así es posible detectar y evaluar heterogeneidades, la medida de espesores ó la determinación de ciertas propiedades tecnológicas de los materiales.

En los ultrasonidos es posible distinguir tres bandas de acuerdo a sus intervalos de frecuencia:

- Infrasónica: esta banda se extiende por debajo de 20 Hz y no tiene aplicaciones en control de materiales estructurales. ⁽⁵⁾
- Sónica: es el intervalo de frecuencia en que el oído humano es capaz de percibir el sonido. En general, se considera que abarca desde 20 Hz para los sonidos más graves hasta 20 KHz para los más agudos. ⁽⁵⁾
- Ultrasónica: la frecuencia es superior a 20 KHz, dentro de esta banda es posible diferenciar a su vez, tres zonas:
 - o La del Ultrasonido próximo con frecuencias entre 20 y 100 KHz, en esta zona operan las técnicas que utilizan elevados niveles de energía.
 - o La banda utilizada en control de calidad de los materiales, la cual se extiende entre 0,2 y 25 MHz.

- o La frecuencia por encima de 100 MHz se consideran dentro del campo de la microscopia acústica. ⁽⁵⁾

Generación de ondas

Las ondas sonoras de ultrasonido, son también conocidas en el campo de ensayos no destructivos como ondas de presión. Esto se debe a la interacción que se produce entre las moléculas adyacentes cuando oscilan, ocasionando mayores presiones entre ellas. Dependiendo del medio de propagación de las ondas, pueden ser clasificadas en mecánicas y no mecánicas.

Siendo las ondas mecánicas las que se propagan en medios deformables ó elásticos. Estas son originadas por una perturbación ó disturbio en una región de un medio elástico.

Las ondas no mecánicas, no necesitan de un medio material de propagación (ondas electromagnéticas).

Las ondas también pueden ser clasificadas por la relación entre la dirección de perturbación y la de propagación como:

- Ondas Longitudinales: son ondas no mecánicas de presión ó compresión que se transmiten a través de cuerpos sólidos, líquidos ó gases, en donde el movimiento de las partículas se da en la misma dirección que la propagación de la onda, es decir, en dirección longitudinal. ⁽⁵⁾

- Ondas Transversales: son ondas mecánicas, transmitidas únicamente en cuerpos sólidos, en donde el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación, es decir, en dirección transversal, y no oscilan según la dirección de propagación sino en ángulo recto, su velocidad de transmisión es aproximadamente el 55% de la velocidad de una onda longitudinal. ⁽⁵⁾
- Ondas de Superficie: son también denominadas ondas de Rayleigh, son ondas mecánicas, consideradas un tipo especial de onda transversal, estas se propagan únicamente en la periferia plana ó curva de un sólido, siguiendo las irregularidades ó contornos de la misma. Su velocidad es aproximadamente del 90 a 95% de la velocidad de una onda transversal en el mismo material. Son capaces de detectar únicamente fracturas ó defectos en la superficie ó muy cerca de ella. ⁽⁵⁾
- Ondas de Lamb: también son conocidas como ondas aplanadas, se propagan dentro del espesor de una lámina delgada, únicamente pueden generarse en determinados ángulos de incidencia, frecuencia y espesor de lámina. Pueden ser clasificadas como ondas mecánicas. La velocidad de propagación de esta depende de su forma y del producto del espesor de la lámina y de su frecuencia. ⁽⁵⁾

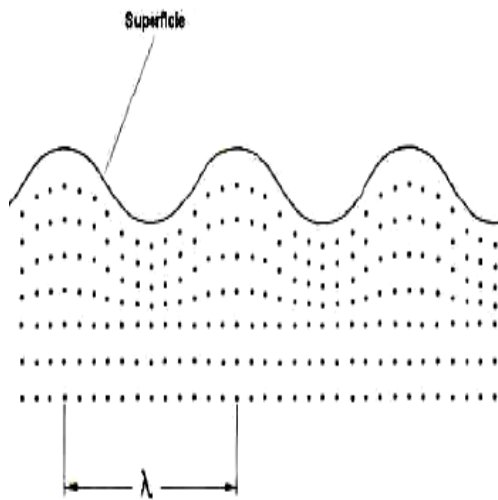


Figura 1. Características de las Ondas de Superficie

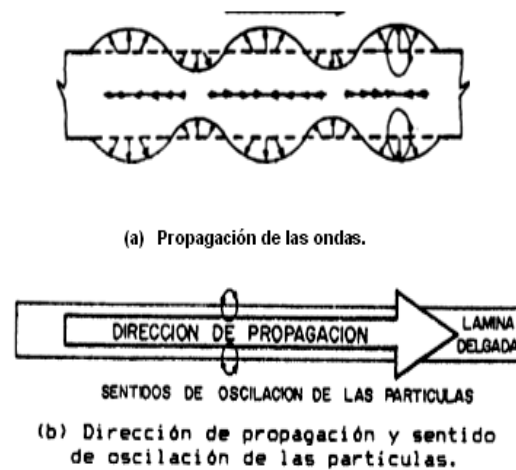


Figura 2. Características de las Ondas de Lamb

Fuente: (6)

Transductores

Para la generación de las ondas ultrasónicas, es empleado un dispositivo que sirve en paralelo como generador y receptor. El elemento que cumple con ambas funciones es un material piezoeléctrico que tiene la propiedad de deformarse al recibir una presión mecánica externa, produciendo una diferencia de potencial eléctrico entre sus caras y a la inversa; al aplicar a sus caras este potencial eléctrico, el material cambia de tamaño produciendo una onda de presión. Este dispositivo recibe el nombre de transductor. ⁽⁷⁾

Generalmente es necesario emplear un acoplante entre el transductor y la superficie de inspección para permitir ó mejorar la transmisión de la

energía ultrasónica, ya que el aire es un mal transmisor de la energía ultrasónica, sólo una pequeña capa acoplante es suficiente para proporcionar una transmisión adecuada de la onda. ⁽⁶⁾

Algunas de las sustancias empleadas como acoplantes son agua, glicerina, grasas con base de petróleo, multigelulosa, ciertos aceites, pulpa de papel, plastilina, mercurio, grasas con base de silicona, aceites minerales de diversos grados de viscosidad y otras tantas pastas. La selección del agente acoplante, para ensayos por el método de contacto directo, depende de la condición, temperatura e inclinación superficiales de la pieza de ensayo. ⁽⁶⁾

Características de los transductores:

- Generalmente suelen ser de titanato de bario, metaborato de plomo, sulfato de litio y cuarzo.
- Es sensible y tiene gran poder resolutivo. A medida que este convierte mayor energía eléctrica en energía sonora entonces mayor será su sensibilidad, lo que se traduce en una mayor posibilidad de detectar discontinuidades de pequeño tamaño a la hora de realizar una inspección. ⁽⁶⁾
- Transmite las ondas ultrasónicas únicamente en sentido perpendicular a las superficies a las que se aplican cargas eléctricas. ⁽⁵⁾

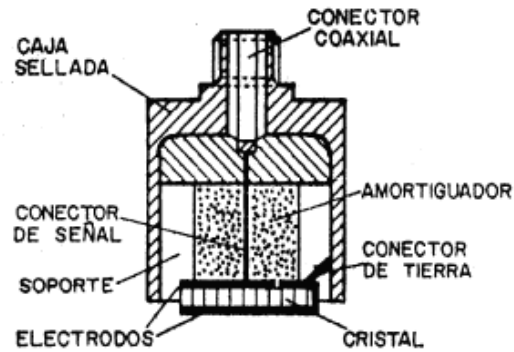


Figura 3. Corte de un transductor

Fuente: (6)

Tipos de Transductores

Transductores de contacto: Son empleados directamente en la superficie de inspección, aplicando presión, e intercalando generalmente un medio de acoplamiento líquido ó semi-líquido. ⁽⁶⁾

Transductores angulares: Son utilizados en equipos de pulso-eco y transmisión, es un transductor de ondas longitudinales que se coloca sobre una cuña de metacrilato con un ángulo adecuado, para generar y detectar ondas transversales. ⁽⁶⁾

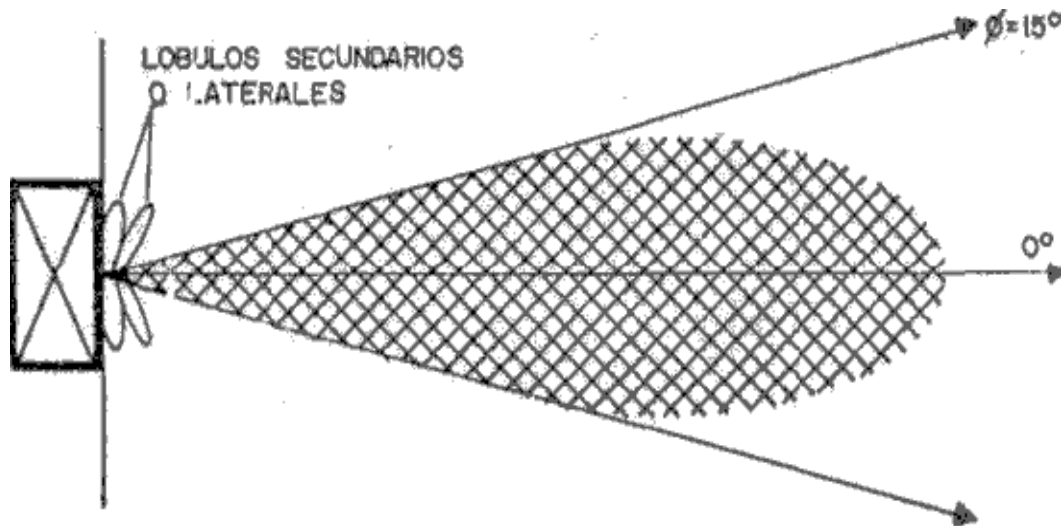


Figura 4. Geometría del haz para un transductor con un ángulo de divergencia de 15°
Fuente: 2

Transductores de inmersión: Son empleados en los ensayos por inmersión, la transmisión del ultrasonido entre el transductor y la superficie de inspección, se efectúa a través de una columna de líquido, es decir, no existe contacto directo, presión ó roce, por lo que los riesgos de desgaste del transductor son eliminados. ⁽⁵⁾

Transductores de doble cristal: Son utilizados en equipos de pulso-eco y resonancia, este tipo de transductor está compuesto por dos cristales aislados eléctrica y acústicamente, ubicados en una misma carcasa, uno de estos cumple la función de transmisión de la señal y el otro la de receptor de la señal. Estos transductores no poseen problemas ocasionados por la zona muerta y el poder de resolución en la zona de entrada. ⁽⁵⁾

Tipos de transductores especiales:

- Transductores para técnicas a altas y bajas temperaturas
- Transductores para técnicas de inmersión
- Transductores de alta y baja frecuencia
- Transductores para ser usados por la industria nuclear
- Transductores focalizados
- Transductores que emiten ondas superficiales
- Transductores magnéticos
- Transductores para ensayos de materiales compuestos
- Transductores de ángulos variables

Ley de Snell

Es de común conocimiento el caso de un rayo luminoso que se propaga rectilíneamente en un medio transparente y uniforme. Sin embargo, si incide sobre la superficie de separación de un segundo medio, cuyas características difieren del primero, el rayo sufre cambios en rapidez y en dirección de propagación.

La ley empírica que rige el fenómeno de refracción se conoce como ley de Snell.

En la figura 5 se ha representado un rayo que se quiebra al producirse un cambio brusco en las propiedades del medio.

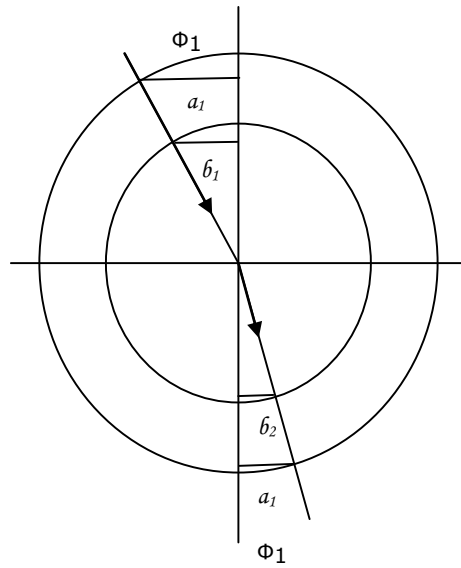


Figura 5

Con la línea normal a la superficie que separa los medios de propiedades distintas, el rayo forma primero un ángulo ϕ_1 y luego un ángulo ϕ_2 . También se han representado dos circunferencias con centro en el punto en el cual se produce el cambio de dirección. Los segmentos destacados con líneas gruesas (a_1, a_2, b_1 y b_2) podrían ser llamados desplazamientos del rayo con respecto a la normal. La ley experimental de Snell dice que:

Independientemente de cuál sea el radio de la circunferencia considerada, para un rayo de luz dado, la razón de los desplazamientos en uno y otro medio es la misma y depende

sólo de la naturaleza de los medios elegidos y del orden en que se los haya dispuesto. ⁽⁸⁾

Matemáticamente,

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{b_2}{b_1} = f(\text{medios, orden}) \quad \text{Ecuación 1}$$

De todas las circunferencias que se pueden considerar es particularmente importante la de radio 1, pues para ella la medida de un desplazamiento cualquiera es igual al seno del ángulo que el rayo forma con la normal (ver figura 6).

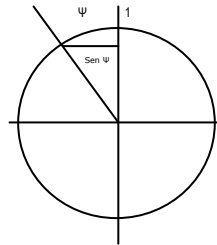


Figura 6

La ley de Snell, se puede escribir entonces así:

$$\frac{\text{sen } \varphi_2}{\text{sen } \varphi_1} = n_{1,2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde $n_{1,2}$ es el índice refracción del medio 1 relativo al del medio 2. Esta ecuación es la formalización de Descartes de la ley de la refracción.

Campo sónico

El área influenciada por las vibraciones transmitidas por el transductor es denominada campo sónico. Este es de suma importancia para la detección y evaluación de las discontinuidades, por ello es necesario definir algunos términos especiales referentes al campo sónico y al comportamiento de la presión acústica en él. ⁽⁵⁾

El haz ultrasónico: este se proyecta de forma cónica. Al medir la intensidad del haz sonoro a una distancia del transductor, es posible distinguir tres zonas diferentes, las cuales son conocidas como: Zona muerta, Zona de campo cercano ó Zona de Fresnel y Zona de campo lejano ó Zona de Fraunhofer. ⁽⁶⁾

Zona Muerta: esta zona comprende la interfaz del transductor con el material base, es la distancia desde la superficie de ensayo hasta la profundidad de inspección en la cual no es posible detectar discontinuidades, producto de la interferencia ocasionada por las vibraciones del cristal del transductor y su presencia en el haz. Es determinada por el tiempo de oscilación, es decir, el tiempo requerido por el cristal para generar el pulso de vibración. ^(5, 6)

Zona de campo cercano: es conocida también como zona de Fresnel, y es la región más cercana al transductor, a pesar de ser de gran importancia para la validez de los resultados, el efecto producido por esta zona es muchas veces desconocido ó ignorado. ⁽⁶⁾

Zona de campo lejano: se encuentra a continuación de la zona de campo cercano. En esta zona la intensidad ó la presión sonora se estabiliza, teniendo mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz y va disminuyendo hacia los límites del mismo. A medida que se aleja del límite entre las zonas de campo cercano y lejano, la presión disminuirá exponencialmente por efecto de diversos factores productores de pérdidas, entre estos se encuentra la divergencia del haz. ⁽⁶⁾

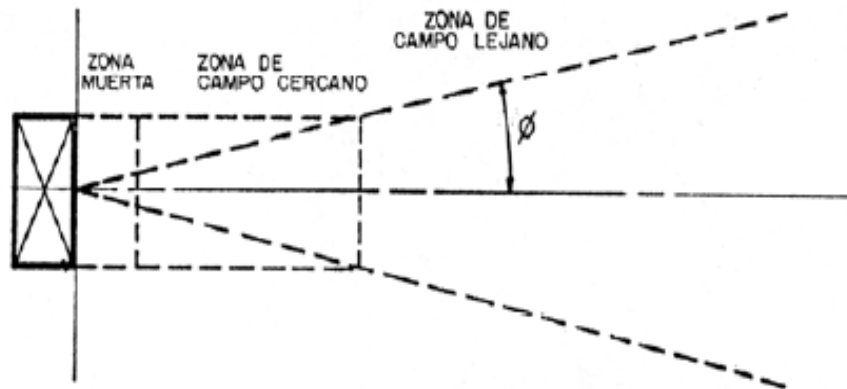


Figura 7. Diagrama del haz ultrasónico mostrando las diferentes zonas de intensidad

Fuente: 6

Métodos de Inspección

La inspección por ultrasonidos puede ser realizada mediante distintos ensayos:

Método de transmisión: Este método, también llamado de transparencia, está basado en el efecto de sombra que un obstáculo (discontinuidad), en una muestra, produce al ser interpuesto por un haz ultrasónico. El método, es aplicado utilizando dos transductores ó dos cristales, de manera que uno actúa únicamente como emisor y el otro como receptor. La emisión y recepción de ondas puede hacerse de forma tanto continua como con pulsos ultrasónicos de corta duración. Si el material se encuentra libre de heterogeneidades, la amplitud de la onda será máxima, e irá disminuyendo a medida que el haz va siendo interceptado por discontinuidades de tamaño creciente. ⁽⁵⁾

Los equipos diseñados para operar según estos métodos, tienen una limitación fundamental de dar únicamente información de amplitud, adicionalmente, se une el hecho de que la variación de la amplitud puede ser producto de factores que nada tienen que ver con el estado de la muestra, como lo son el enfrentamiento de los transductores y la uniformidad del acoplamiento, además de la necesidad de acceso por las dos superficies de la muestra. ⁽⁶⁾

Método de pulso-eco: Con este método es posible la medición del tiempo que tarda la onda en recorrer la muestra mediante el empleo de impulsos cortos y la presentación en el tubo de rayos catódicos

sincronizada con la emisión de estos impulsos. Efectivamente, el tiempo que tarda el impulso en recorrer la muestra y sus reflexiones, ecos, en la pared del fondo y en las posibles discontinuidades, se representan en la base de tiempos en forma de deflexiones verticales cuya altura es proporcional a la presión acústica del eco correspondiente. ⁽⁵⁾

El impulso eléctrico generado, excita el transductor emisor, produciendo la emisión de un impulso acústico que pasa a la muestra mediante el medio de acoplamiento. Al encontrar algún obstáculo en su recorrido, se refleja y vuelve al receptor. El cual a su vez, genera un impulso eléctrico que, convenientemente amplificado, es aplicado a las placas de deflexión vertical con del tubo de rayos catódicos lo que produce la indicación del eco. ⁽⁵⁾

Indicación del eco es la denominación adecuada para cada una de las señales que se observan en la pantalla del tubo de rayos catódicos, ya que, estas señales son simplemente una representación de los auténticos ecos, es decir, de las reflexiones del impulso acústico en el interior de la muestra. ⁽⁵⁾

Método de resonancia: Con este método es posible obtener múltiplos de medidas longitudinales de ondas que igualan un determinado espesor de material, variando la frecuencia de la onda transmitida a este. ⁽⁵⁾

Método de inmersión: Para la aplicación de este método es necesario sumergir la muestra en un líquido, para así transmitir y recibir a través de las ondas ultrasónicas. ⁽⁵⁾

Ventajas del Ultrasonido industrial

- Alto poder de penetración
- Alta sensibilidad
- Gran exactitud en la localización de discontinuidades y evaluación de su tamaño.
- No requiere el acceso a ambas caras de la superficie a inspeccionar.
- Permite inspeccionar grandes volúmenes de material.
- Es inofensivo para el operador.
- La inspección por ultrasonido es automatizable.
- Sus aplicaciones están reguladas por normas y códigos.
- Puede ser aplicado en superficies de gran espesor.

Limitaciones del ultrasonido industrial

- Su operación es básicamente manual.
- Es necesario un alto entrenamiento para el operador.
- Se requieren superficies sin irregularidades.
- La geometría de la pieza y los espesores pequeños afectan la inspección.
- Es necesario el empleo de sustancias acoplantes.
- Se requiere de estándares de comparación.
- El operador debe estar calificado y certificado.

2.5. Procesamiento de Señales

En el campo del procesamiento de señales digitales, se encuentran un grupo de herramientas para descifrar información contenida en los fenómenos físicos. Se inicia una dinámica desde la obtención de una señal la cual es tratada hasta convertirla en una entrada adecuada para ser interpretada, es entonces que se inicia el procesamiento de señales.

A continuación se exponen algunos conceptos que permiten el entendimiento del proceso de señales digitales.

Señal: Se define como una cantidad física que varia con el tiempo, espacio, o cualquier otra variable o variables independientes. ⁽⁹⁾

Ruido: Es cualquier señal indeseable que tiende a interferir con la recepción normal de la señal deseada, de origen eléctrico, o debido a agentes reflectores de material. ⁽¹⁰⁾

Sistema: Se puede definir como un dispositivo físico que realiza una operación sobre una señal. Ejemplo: filtro para reducir el ruido de una señal. ⁽¹⁰⁾

Fuente de señal: Es el medio físico que origina una señal a través de un estímulo. ⁽¹⁰⁾

Procesamiento de señales: Son las operaciones que implican la separación de la señal deseada del ruido y la interferencia. Por ejemplo: una conversión de señal analógica a digital o viceversa. ⁽¹⁰⁾

2.5.1. Clasificación de las señales

Las señales se pueden clasificar en señales analógicas y señales digitales.

Adicionalmente, si una señal toma todos los valores posibles en un intervalo tanto finito como infinito, se dice que es continuo, por el contrario, si toma valores de un conjunto finitos de valores se dice que es discreta.

Entonces, las señales que toman valores de un intervalo infinito en tiempo continuo se denominan señales analógicas y una señal de tiempo discreto que toma valores en un conjunto discreto se denomina señal digital.

El procesamiento digital de señales (sus siglas en inglés DSP- Digital Signal Process) es una técnica que convierte señales de fuentes reales (usualmente en forma analógica), en datos digitales que luego pueden ser analizados. Este análisis es realizado es forma digital pues una vez que una señal ha sido reducida a valores numéricos discretos, sus componentes pueden ser aislados, analizados y reordenados más fácilmente que en su primitiva forma analógica.

2.6. Análisis frecuencial de señales.

Transformada de Fourier

Uno de los beneficios principales del DSP es que las transformaciones de las señales se realizan de una forma mucho más sencilla. Una de las transformadas más importantes es la Transformada de Fourier Discreta (TFD). Básicamente la Transformada de Fourier se encarga de transformar una señal del dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia, de donde se puede realizar su antitransformada y volver al dominio temporal. La TFD permite un análisis más sencillo y eficaz sobre la frecuencia, sobre todo en aplicaciones de eliminación de ruido y en otros tipos de filtrado. ⁽¹⁰⁾

El principio fundamental de estos algoritmos está basado en descomponer el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier de una secuencia de longitud N en pequeñas Transformadas de Fourier sucesivas. Existen dos maneras fundamentales en la que estos algoritmos logran implementar este principio; la primera llamada Decimacion en Tiempo, descompone la secuencia $x(n)$ en pequeñas subsecuencias sucesivas, y la segunda Decimacion en Frecuencia descompone los coeficientes de la Transformada Discreta de Fourier $X(k)$ en pequeñas subsecuencias. ⁽¹⁰⁾

El número de operaciones requeridas con el uso de la TFD es de $4N\log_2 N$ operaciones, donde N es el número de puntos que se

muestran. El número de puntos muestreados o valores en el dominio del tiempo que deben ser introducidos debe ser una potencia de dos $(2M)$.⁽¹⁰⁾ La TFD provee una eficiente manera de calcular estimaciones del poder espectral a frecuencias igualmente espaciadas de valor $w_k = (2\pi/M)k$, donde M es el número de puntos muestreados. El espectro de frecuencia es la representación de una señal en el dominio de frecuencias, este es muy importante para el estudio del comportamiento de las señales ya que de su observación podemos identificar las bandas de frecuencia.

CAPITULO III
Marco Metodológico

3. Marco Metodológico

A partir de la técnica no destructiva de ultrasonido industrial se realizó el estudio de la estructura interna de una serie de cordones de soldadura realizados en probetas de acero ASTM A36, previamente ensayadas por la técnica de radiografía industrial. En la Figura 8, se explica de manera esquemática el procedimiento experimental llevado a cabo para la realización de este trabajo de investigación.

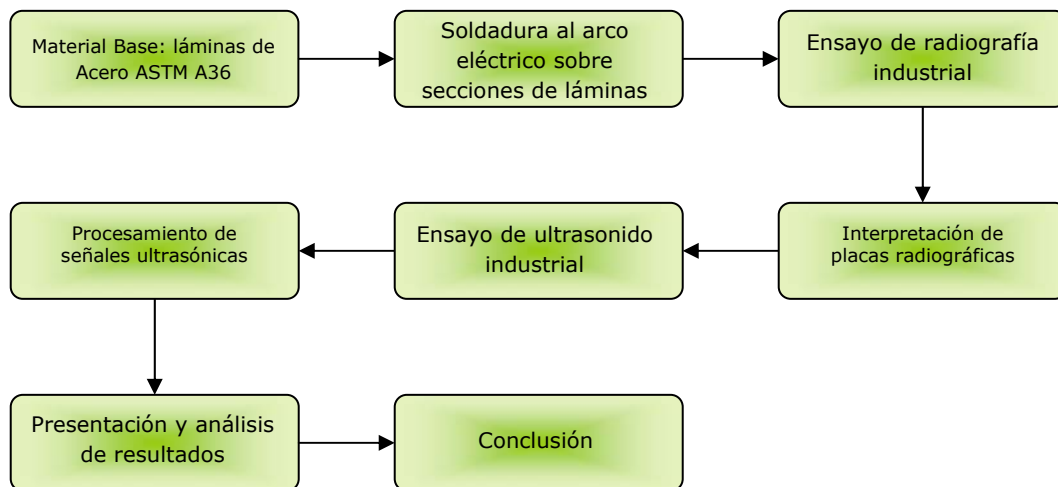


Figura 8. Esquema representativo del procedimiento

3.1. Equipos e instrumentos utilizados

- Computador con los programas instalados: OpenChoice PC Communication Software TDS 210 Tektronix.
- Equipo de ultrasonido marca Sonametric, modelo Epoch LT.
- Osciloscopio digital: Tektronix TDS 210 (apreciación $\pm 0,01\%$).
- Vernier con intervalo de 0,000 a 150,000 mm (apreciación $\pm 0,005$ mm).
- Cables coaxiales con conexiones BNC - Microdot.
- Cables Lemo ffc 00 - Microdot.
- Cables BNC - Lemo ffc 00.
- Cables BNC - BNC.
- Conectores Lemo ffc 00.
- Conectores BNC en forma de T macho - macho - hembra.
- Transductor de ondas transversales de 12,7 mm (0,5 pulgadas) y 2,25 MHz.
- Zapata angular de 60 grados.
- Bloque de calibración normalizado por el Instituto Internacional de la Soldadura (I.I.W.) V-1.

3.2. Descripción del material base

Para la realización de este trabajo de investigación, se utilizaron 3 probetas de distintas dimensiones, medidas con un Vernier de

apreciación 0.005 mm en distintos puntos de las placas y tomando el promedio de estas.

Estas probetas se construyeron a partir de dos placas de acero ASTM A36.

A continuación se presenta una tabla especificando el promedio de las medidas tomadas.

Tabla 2: Dimensión de las probetas

	Primera Placa			Segunda Placa			Ancho Total de Probeta
	Ancho	Largo	Espesor	Ancho	Largo	Espesor	
Probeta A	9,500	26,000	12,350	9,350	26,000	12,400	20,300
Probeta B	11,450	14,600	12,800	12,100	14,600	12,700	24,200
Probeta C	7,500	15,100	13,310	7,400	15,100	13,220	15,400

3.3. Proceso de soldadura

Para la construcción de las probetas a partir de secciones de láminas de acero, se utilizó un proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, siguiendo los pasos que se explican a continuación.

- Se tomaron 3 pares de placas de acero ASTM A36, con un bisel de 30° con la vertical en uno de sus extremos y se colocaron con la siguiente configuración.

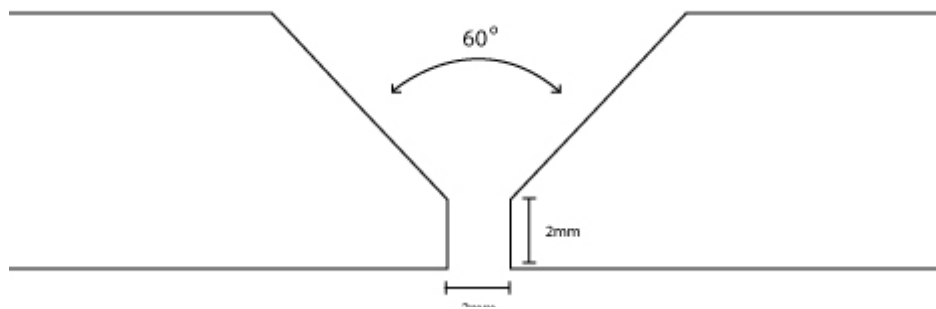


Figura 9. Configuración de placas biseladas para soldadura

- Siguiendo las recomendaciones de la Sociedad Americana de Soldadura (sus siglas en inglés AWS-American Welding Society), se seleccionaron los electrodos adecuados para la fusión de los metales.
- En cada uno de los pares de placas se realizó un punteado con el electrodo E6010 en los extremos y en el centro del bisel para garantizar la fijación de las láminas a soldar.

- Se aplicaron tres (3) cordones de soldadura sobre el bisel. El primer pase electrodo AWS A5.1 designación E6010, y el segundo y tercer cordón con electrodos AWS A5.1 designación E7018.
- Entre cordones y sobre el último cordón se aplico limpieza mecánica, con la finalidad de asegurar la penetración del siguiente cordón y realizar inspección visual conforme a los lineamientos de la AWS B1.11

3.4. Ensayo de radiografía industrial

La inspección radiográfica se realizó a lo largo de las juntas soldadas, con la finalidad de identificar los posibles indicaciones internas generadas durante el proceso de la soldadura.

Este ensayo radiográfico se llevó a cabo en el laboratorio de radiología industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, con una fuente de radiación de Rayos X, Marca *Andrex* de potencia variable con una capacidad de hasta 160 kVolt, 10 min y 5 μ Amp con un tamaño de foco de 2,5 x 2,5 mm y ángulo de emergencia de 54°.

La exposición radiográfica aplicada fue de 10 min x 2 microAmp

3.5. Interpretación de placas radiográficas

La interpretación de las placas radiográficas se llevó a cabo observando la presencia en las películas radiografías de diversas indicaciones con características particulares y comparándolas con las indicaciones mostradas en la Tabla 1, obteniendo así la identificación de las discontinuidades existentes en los cordones de soldadura.

3.6. Ensayo de ultrasonido industrial

Para realizar el ensayo de ultrasonido industrial se procedió:

- Se realizó una limpieza mecánica a la superficie de contacto de las probetas para liberarla de cualquier elemento que pudiera obstaculizar el movimiento del transductor.
- Se seleccionó un cable coaxial con conexiones Lemo ffc00 – Microdot compatible con el equipo de ultrasonido y transductor.
- Se seleccionó un transductor de ondas transversales de 12,7 mm (0,5 pulgadas) y 2,25 MHz.
- Se seleccionó una zapata angular de 60° tomando en consideración el espesor de las probetas.
- Empleando la Ley de Snell se verificó el ángulo de reflexión ó incidencia de la zapata.
- Se utilizó un bloque de calibración I.I.W. V-1 para el ajuste en distancia y sensibilidad de transductores, posteriormente se

procedió a la calibración de la base de tiempos del equipo de ultrasonido bajo las recomendaciones del código de la Sociedad Americana de Ingeniería Mecánica Sección V (sus siglas en inglés ASME):

- o Se verificó el punto de salida de la zapata del eje del haz, ubicando el transductor sobre el bloque V-1 (como se muestra en la Figura 10) en el punto máximo de la reflexión en el cuadrante de 100 mm
- o Se verificó el ángulo real del transductor ubicándolo sobre el bloque V-1 (como se muestra en la Figura 11) en el punto máximo de la reflexión del taladro de 50 mm de diámetro, el ángulo marcado en este punto en la escala del bloque indica el ángulo real del transductor.

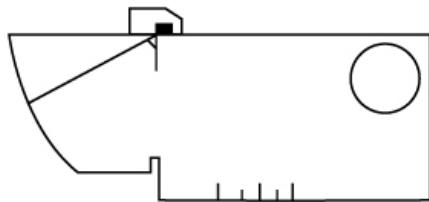


Figura 10. Determinación del punto de salida del eje del haz.

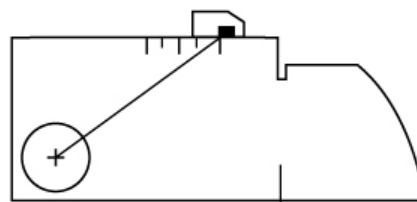


Figura 11. Determinación del ángulo real del transductor.

- o Se eligió un campo (extensión en horizontal) de 100 mm para ser representado en la pantalla del equipo. De manera que cada unidad de pantalla corresponde a un (1) mm
- o Se calculo la ubicación de las indicaciones en el campo.

- o Se confirmó que las indicaciones coincidían con las ubicaciones calculadas con respecto al campo.
 - o Se colocó el transductor sobre la superficie del bloque patrón y se buscó el máximo eco de interés. Una vez obtenido se aseguró que el transductor no se moviera.
 - o Mediante la función CAL (calibrar) y los mandos que controlan la velocidad de barrido y el desplazamiento de la imagen en la pantalla del equipo, se llevaron los ecos a las posiciones previamente calculadas.
 - o Se comprobó la correcta calibración del equipo colocando el transductor sobre el bloque patrón en otra posición, y se verificó que el eco máximo efectivamente aparecía en la posición correspondiente.
- Una vez calibrado el equipo se procedió a la construcción de la curva de corrección de la distancia-amplitud (DAC):
 - o Se utilizó un bloque de referencia de calibración el cual cuenta con agujeros en cada uno de sus esquinas a diferentes distancias del borde superior como se muestra en la figura 12.

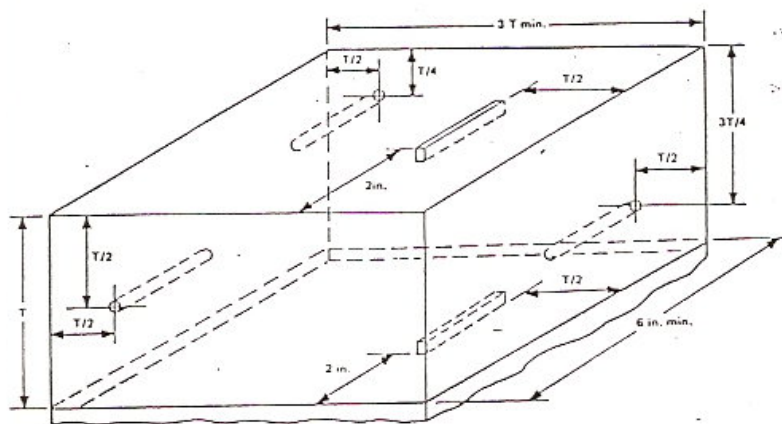


Figura 12. Bloque patrón de calibración básica.

- o Moviendo el transductor sobre el bloque, se buscó la señal del agujero superior y se buscó el pico máximo del mismo. A continuación se llevo el nivel de la ganancia al 80% de altura de pantalla y se marcó el punto máximo sobre la pantalla.
 - o Sin cambiar el nivel de ganancia, se procedió a ubicar los siguientes agujeros y marcar los puntos máximos en la pantalla.
 - o Se trazó la curva DAC uniendo los puntos tomados.
- Se calcularon las distancias angulares desde la salida del transductor hasta la base y alto del refuerzo de la soldadura, empleando relaciones trigonométricas.

- Tomando como referencia la ubicación de las indicaciones observada en las placas radiográficas y con las distancias angulares calculadas, se procedió a la búsqueda y registro de las señales obtenidas a partir de las indicaciones proveniente del ultrasonido. Esto se realizó a ambos lados del cordón de soldadura para cada una de las discontinuidades.

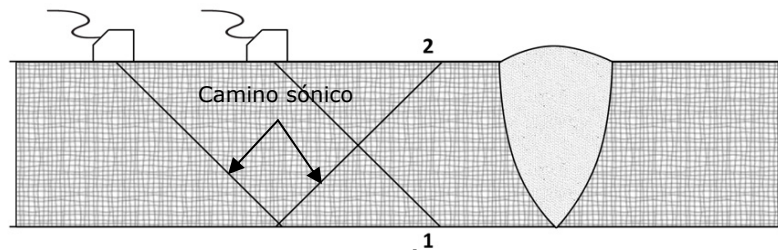


Figura 13. Recorrido del eco ultrasónico desde la salida del transductor hasta la base y alto del refuerzo de la soldadura.

Camino sónico (distancia) correspondiente a un tiempo de ida y regreso, para una onda ultrasónica, la cual viaja a un ángulo y velocidad de onda determinada por el tipo de material y según la Ley de Snell señala.

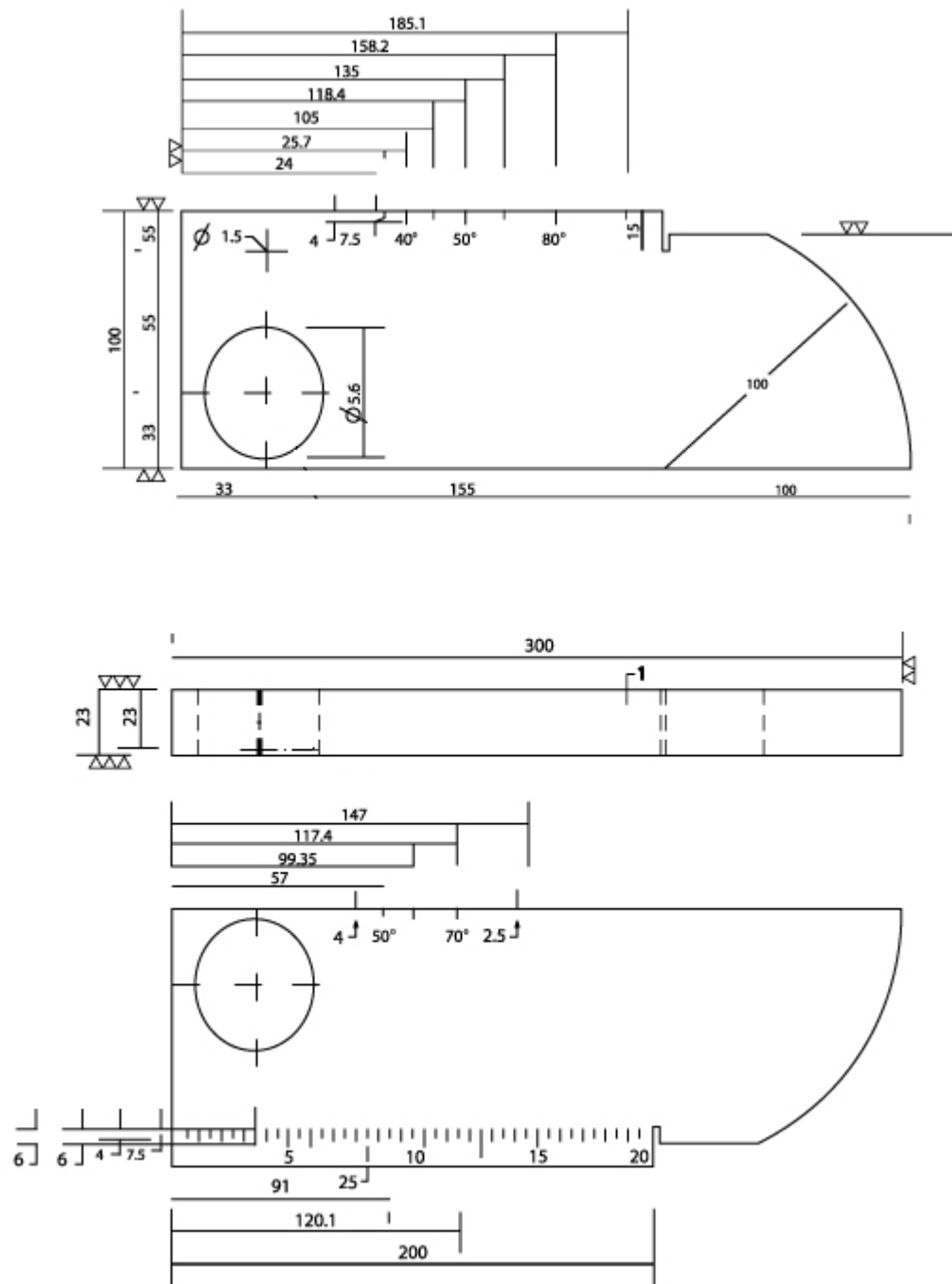


Figura 14. Bloque de calibración ASME I.I.W. V-1

3.7. Procesamiento de señales ultrasónicas

Para procesar las señales de las discontinuidades provenientes del equipo de ultrasonido, se realizó un montaje en el cual se realizó la conexión en paralelo - equipo de ultrasonido y osciloscopio digital. El osciloscopio se conectó con el computador a través de una interfase RS232 (en inglés Recommended Standard 232).

Una vez conectados estos instrumentos y ya con la representación de la señal del ultrasonido en el osciloscopio, se graduaron los intervalos horizontales (base tiempo) y verticales (amplitud) del osciloscopio con el objeto de apreciar las señales con mayor resolución y amplitud. Luego se inició el registro y transferencia de datos al computador, empleando el programa OpenChoice PC Communication Software TDS 210 Tektronix (demo), el cual crea un archivo con los datos en una hoja de cálculo. La señal de cada una de las discontinuidades fue tomada varias veces de cada lado del cordón de soldadura variando en cada toma los valores del voltaje y los intervalos de tiempo en el osciloscopio, con la finalidad de posteriormente tener la posibilidad de seleccionar la señal que de manera más clara describiera la discontinuidad estudiada.

Las señales fueron almacenadas siguiendo la notación que se indica a continuación:

Letra designada a la probeta + Angulo de la zapata + Tipo de discontinuidad + Número asignado a la discontinuidad en la probeta + Número de captura de la señal + Discontinuidad.

Donde las letras designadas a las probetas fueron A, B, C, el tipo de discontinuidad podía ser superficial (S) ó volumétrica (V), y las discontinuidades: poros (p), exceso de material (m), grieta (g), agujeros (a), falta de fusión (f), escoria (e).

Ejemplo:

- A60V1-1a: Probeta A, zapata de 60 grados, discontinuidad volumétrica, discontinuidad N° 1, captura N° 1, agujero.
- B60V3-4e: Probeta B, zapata de 60 grados, discontinuidad volumétrica, discontinuidad N° 3, captura N° 4, escoria.

Para seleccionar la zona de la curva asociada a la indicación en estudio, se procedió a calcular el tiempo de vuelo del haz ultrasónico desde la salida del transductor hasta su ubicación en el cordón de soldadura, tomando en cuenta la velocidad del haz ultrasónico en el metal base y el espesor de la probeta. De la siguiente manera.

$$V_c = \frac{2 \cdot d}{t_v} = \frac{2 \cdot e \cdot \cos 60}{t_v}$$

Donde:

d = Recorrido del haz ultrasónico

V_c = Velocidad transversal en el material

e = espesor de la probeta

t_v = tiempo de vuelo

Una vez ubicado el valor del tiempo de vuelo, se procedió a seleccionar las gráficas donde el punto con mayor energía se encontrara en las proximidades de este valor.

3.8. Diseño del programa.

El procedimiento del programa se describe mediante los siguientes pasos:

1. Cargar las opciones para el llamado de los archivos pertinentes.
2. Llamar a la función procesar.m con el archivo que lleva la data en cuestión como parámetro.
3. Asigna nombre a la gráfica.
4. Crea una estructura gráfica de 4 gráficos por ventana.
5. Ajusta el tamaño y posición de la ventana de gráficos.
6. Dibuja en la ventanilla gráfica 1 la señal completa.
7. Limita el intervalo de búsqueda de máximos en la data.
8. Halla los picos de la señal en el intervalo mencionado en 6.
9. Anota en la ventanilla gráfica 1 las coordenadas del máximo hallado en 8.
10. Dibuja en la ventanilla gráfica 1 los límites del intervalo de acercamiento donde está el máximo.
11. Dibuja en la ventanilla gráfica 2 el acercamiento de la señal donde se encuentra el valor máximo.
12. Anota en la ventanilla gráfica 2 las coordenadas del máximo hallado en 8.

13. Dibuja en la ventanilla gráfica 3 la transformada de Fourier del acercamiento.
14. Anota en la ventanilla gráfica 3 las coordenadas del máximo hallado en la transformada de Fourier.
15. Dibuja en la ventanilla gráfica 4 la densidad espectral de potencia de la señal en el acercamiento.

CAPITULO IV
Resultados y Análisis de Resultados

3.9. Soldadura en probetas por arco eléctrico

Se obtuvieron las tres (3) probetas mediante la unión por soldadura como se mencionó en la sección 3.3; las fotografías se muestran a continuación:



Foto 1: Probeta A



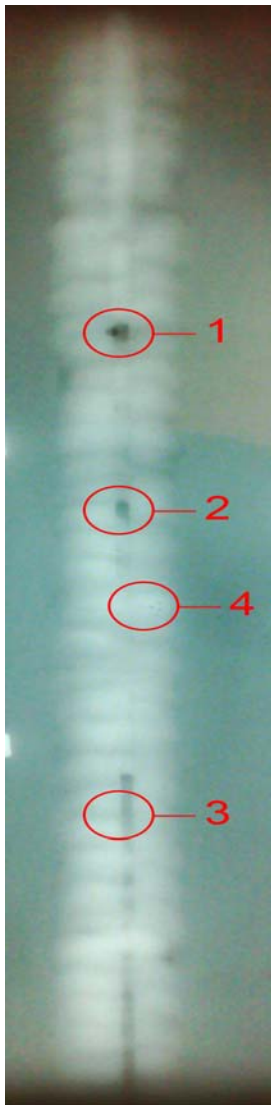
Foto 2: Probeta B



Foto 3: Probeta C

3.10. Resultados de Ensayo de radiografía industrial

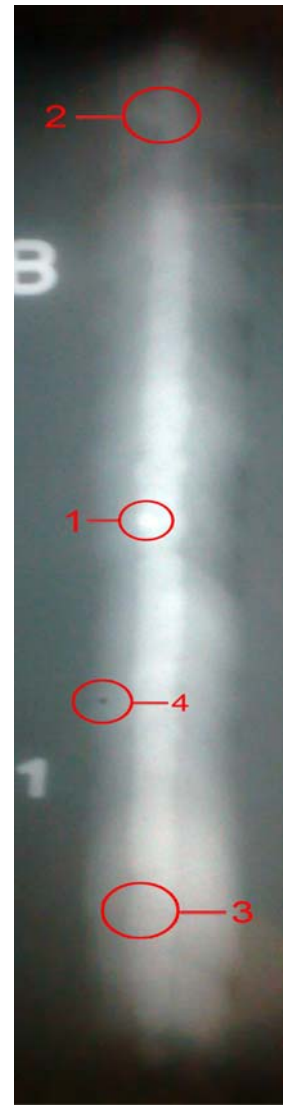
A continuación se presentan los resultados del ensayo de radiografía industrial:



**Foto 4: Placa radiográfica
cordón de soldadura
Probeta A**



**Foto 5: Placa radiográfica
cordón de soldadura
Probeta B**



**Foto 6: Placa radiográfica
cordón de soldadura
Probeta C**

Como se puede apreciar en las representaciones de las películas radiográficas escaneadas, mostradas anteriormente las indicaciones son:

Probeta A:

- 1) Agujero.
- 2) Falta de fusión.
- 3) Falta de fusión.
- 4) Grupo de poros.

Probeta B:

- 1) Falta de fusión.
- 2) Falta de fusión.
- 3) Escoria.
- 4) Exceso de material (en el refuerzo de la soldadura).
- 5) Poro.
- 6) Falta de fusión.

Probeta C:

- 1) Exceso de material (en el refuerzo de la soldadura).
- 2) Exceso de material (en el refuerzo de la soldadura).

3) Falta de fusión.

4) Poro.

Se decidió tomar en consideración para su estudio únicamente las indicaciones ultrasónicas provenientes de falta de fusión, escorias y poros aislados, debido a que son:

- Generadas durante el proceso de soldadura.
- Son internas (en la masa del material y/o en la raíz de la soldadura).
- Aisladas con la finalidad de evitar la interferencia entre dos o más indicaciones.

3.11. Resultados del ensayo no destructivo de ultrasonido industrial y procesamiento de señales.

El conocimiento de los diferentes tipos de discontinuidades y las razones por las cuales estas se presentan, es esencial para una correcta interpretación de las curvas en la pantalla.

Si se sabe qué tipo de discontinuidad se originan por las diferentes técnicas de soldadura en especial al arco eléctrico con electrodos revestidos, no solo el tiempo requerido para el análisis se reducirá sino que además la caracterización de las indicaciones se realizará de manera más precisa.

No existe una técnica convencional de ultrasonido industrial capaz de encontrar todas las fallas existentes en un material bajo evaluación. Las discontinuidades que se pueden apreciar mediante la técnica utilizada en el presente estudio, la cual consiste en emisión recepción, (mediante la utilización de un transductor con zapata angular y exploración con movimientos de zigzag), son conocidos como indicaciones tridimensionales ya que cuentan con cuerpo y caras reflectoras que hacen rebotar los haces ultrasónicos de vuelta al transductor.

También existen otros tipos de discontinuidades (y/o defectos) bidimensionales que requieren de:

- Realizar la evaluación con un transductor por la técnica de emisión – recepción variando el ángulo de incidencia del haz ultrasónico mediante el cambio o variación de la zapata.
- Una técnica de doble palpador por no estar orientados correctamente con respecto al ángulo del transductor.

Hay casos donde los ecos ultrasónicos detectan indicaciones que no se atribuyen a fallas por no estar a una distancia lo suficientemente alejada del defecto que se busca, lo cual puede provocar la inadecuada interpretación de datos (señales en la pantalla del equipo de ultrasonido). Por ejemplo, es el caso de las faltas de fusión en la raíz de la soldadura, que están muy próximos al otro lado de la garganta de la soldadura.

Así mismo este tipo de inconveniente se puede apreciar en la figura a continuación, donde se puede observar que la señal en B60V6-1 es parecida a una indicación proveniente a una falta de penetración en la raíz pero que en la representación escaneada de la película radiográfica, no se puede apreciar.

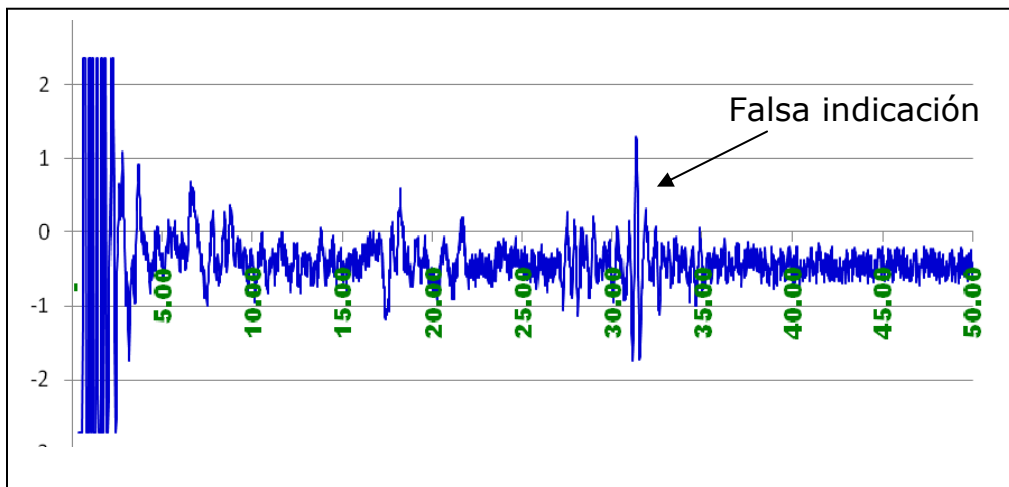


Figura 15: Señal B60V6-1

Esta indicación es característica en los altos- bajos (hi – low) y se debe al escalón que se presenta en las piezas soldadas sin una correcta alineación. Para este caso es importante verificar por inspección visual las piezas desalineadas y/o espesor de los materiales a unir por soldadura.

El transductor empleado en el presente trabajo es de 2,25 MHz de frecuencia (2.250.000 Hz), considerando que la velocidad de las ondas transversales para las aleaciones de acero es de unos 3.223 m/s, la

longitud de onda es de 1,28 mm; así la menor indicación que se puede apreciar es de unos 0,64 mm, lo que es suficiente ya que como regla general no suelen ser de interés discontinuidades con tamaños menores a 1mm.

Adicionalmente a la sensibilidad que se puede obtener mediante la utilización de ondas transversales, se tiene la ventaja de poder evaluar juntas soldadas sin la necesidad de eliminar el refuerzo de soldadura.

Las señales recibidas por el transductor ultrasónico son pulsos de radiofrecuencia que al ser rectificadas y presentados en el modo A-scan muestran la envolvente de la señal, la cual es de gran interés por contener información sobre las características de los reflectores. Sin embargo, cuando se obtiene esta presentación existe la posibilidad de que se pierda información importante para la evaluación y caracterización de las indicaciones provenientes de las señales. Por ejemplo, esta situación puede ser observada en las gráfica mostradas en la figura 16, en la que se muestra en color azul la señal en radiofrecuencia de la discontinuidad numero 1 de la probeta A (agujero), y en color verde esta misma señal ya rectificada y presentada con el modo A-scan. A simple vista es posible diferenciar la cantidad de indicaciones mostradas en cada una de estas presentaciones de la señal, la diferencia entre ellas es clara, mientras que en la señal mostrada en radiofrecuencia es posible distinguir cada una de las indicaciones de la señal, en la presentación de esta en A-scan se dificulta distinguir cada una de las indicaciones ya que muchas de ellas están solapadas entre si.

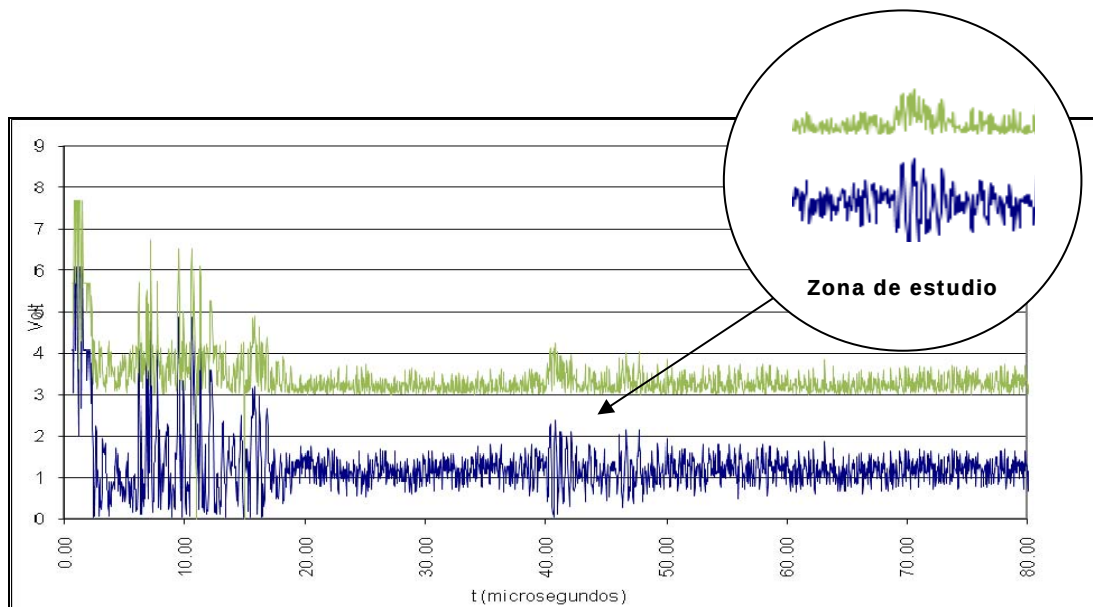


Figura 16: Señal número 1 de la probeta A, presentada en radiofrecuencia y en el modo A-Scan

Motivado a lo antes expuesto, se decidió trabajar las señales proveniente del equipo de ultrasonido presentadas en radiofrecuencia. Adicionalmente y con la finalidad de tener una frecuencia de muestreo superior a la frecuencia del transductor se eligió trabajar con una frecuencia de muestreo de aproximadamente cuatro (4) veces la frecuencia nominal de resonancia del transductor ultrasónico. Seleccionándose una frecuencia de 10 MHz

Mediante el programa elaborado, (ver Anexo 1) se obtuvieron tres (3) gráficas de cada una de las señales, la primera muestra la señal del eco de ultrasonido extraído del osciloscopio (según la conexión mostrada en el procedimiento experimental), la segunda arroja la sección a estudiar del eco, seleccionada por ser la zona asociada a la indicación estudiada

conforme a sección 3.7 y la tercera es la gráfica del cálculo de la transformada de Fourier de señal de interés (segunda gráfica).

A continuación se presentan todas las gráficas obtenidas:

Falta de fusión:

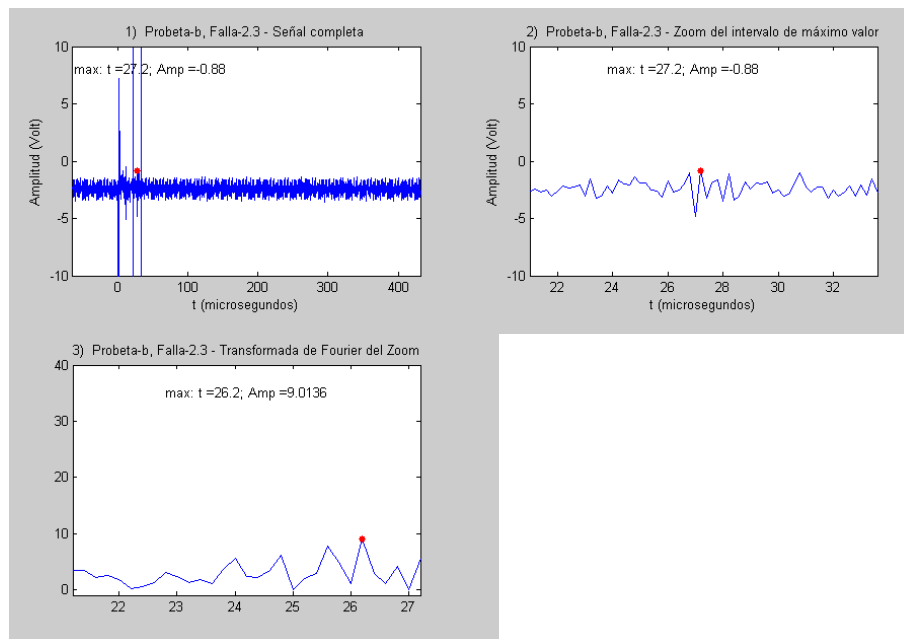


Figura 17: Gráficas de discontinuidad N° 2, vista 3 en la probeta B.

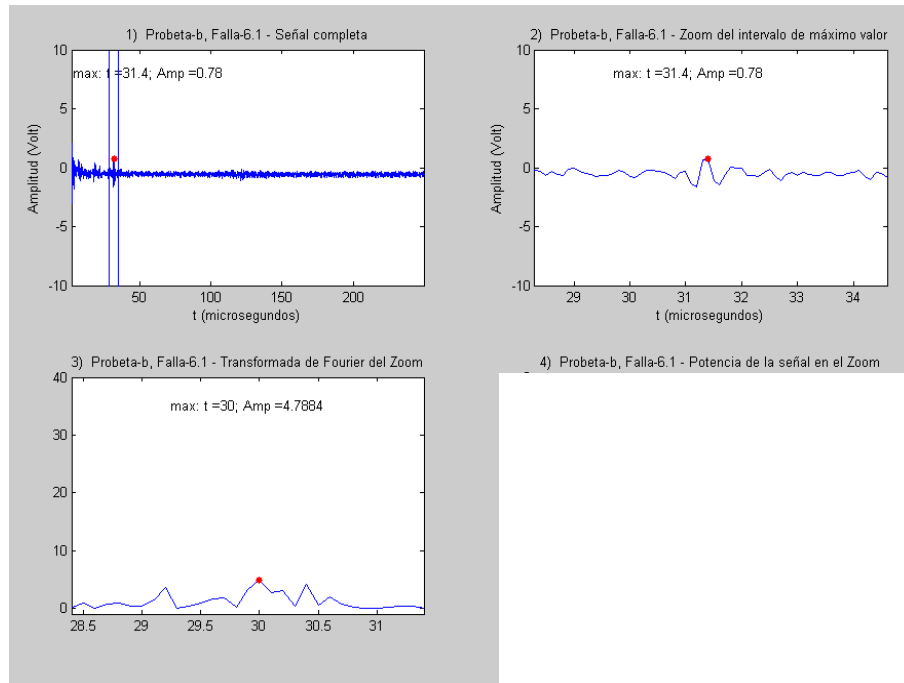


Figura 18: Gráficas de discontinuidad N° 6 vista 1 en la probeta B.

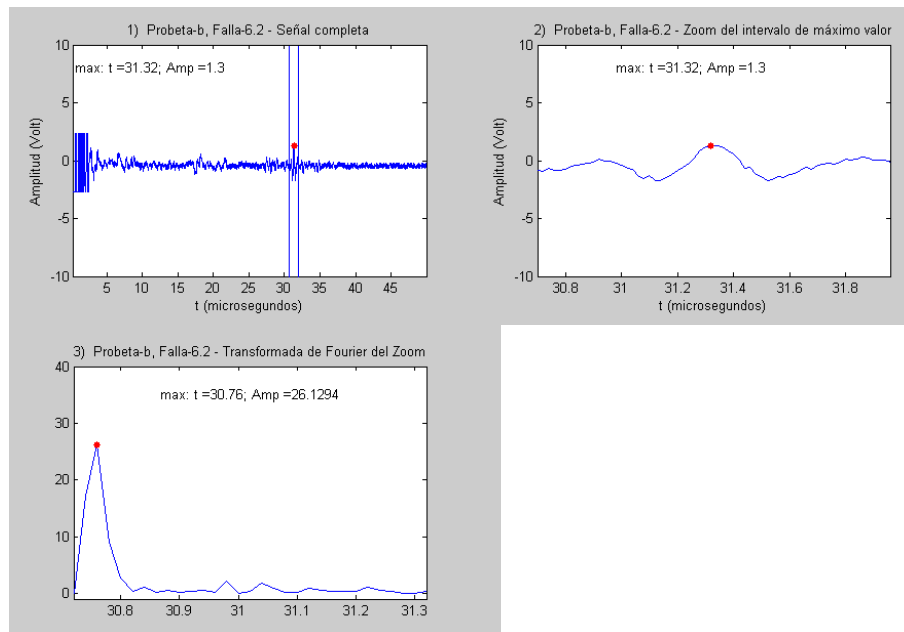


Figura 19: Gráficas de discontinuidad N° 6 vista 2 en la probeta B.

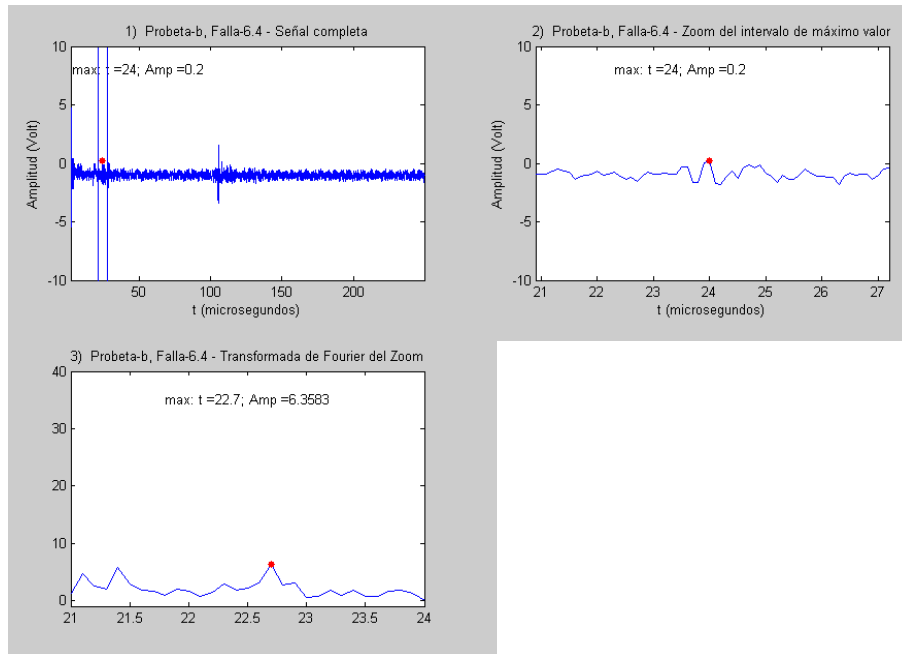


Figura 20: Gráficas de discontinuidad N° 6 vista 4 en la probeta B.

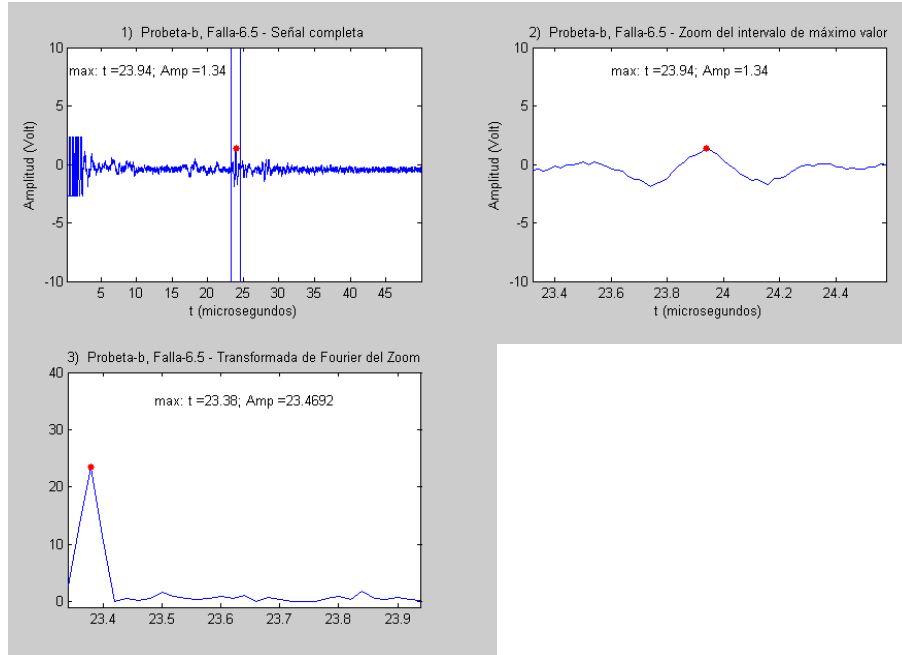


Figura 21: Gráficas de discontinuidad N° 6 vista 5 en la probeta B.

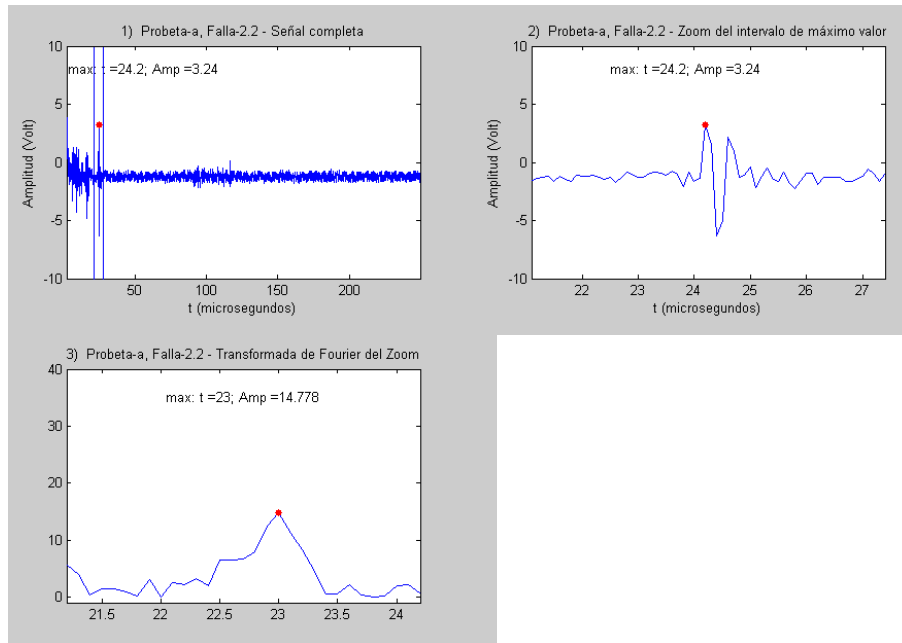


Figura 22: Gráficas de discontinuidad N° 2 vista 2 en la probeta A.

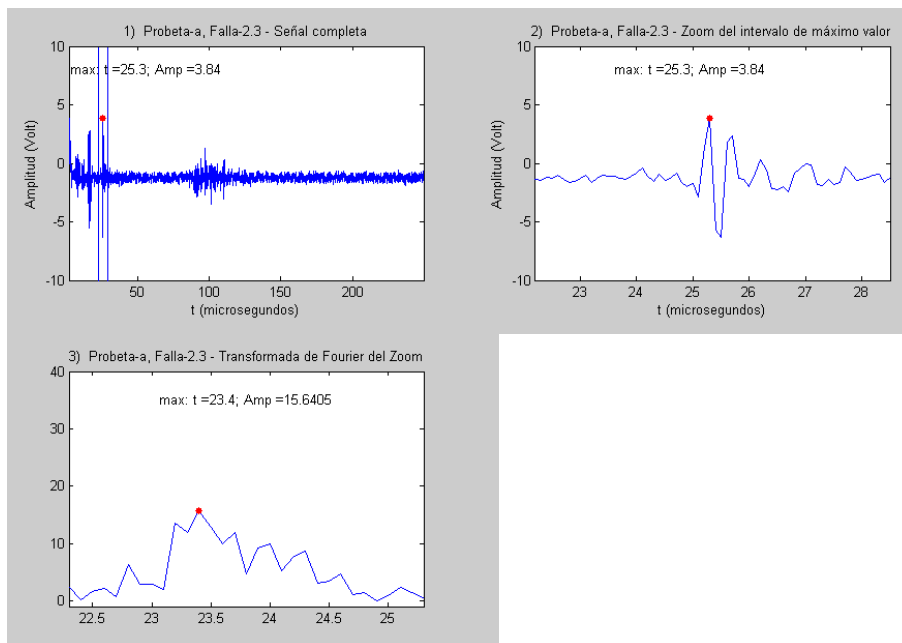


Figura 23: Gráficas de discontinuidad N° 2 vista 3 en la probeta A.

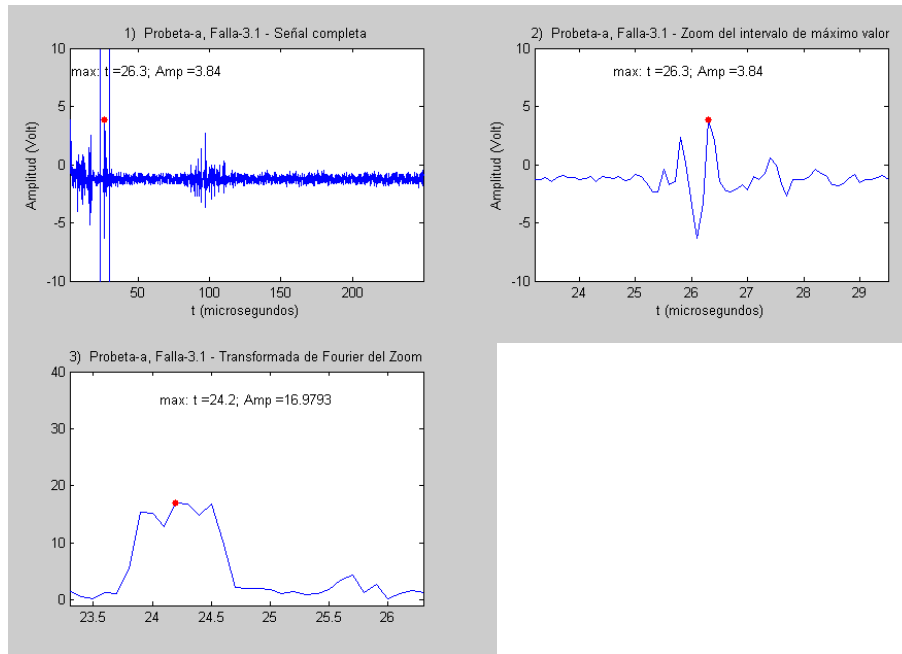


Figura 24: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 1 en la probeta A.

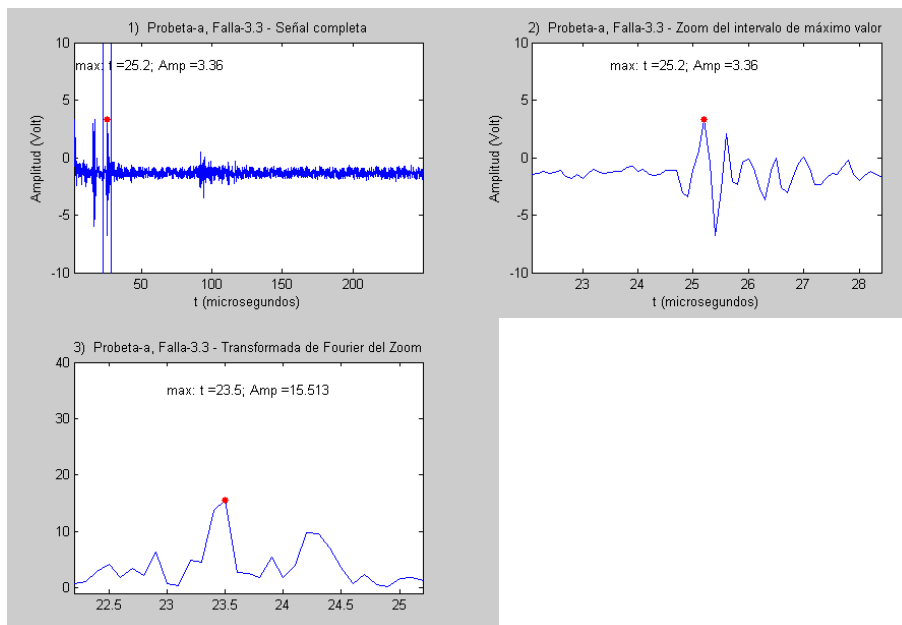


Figura 25: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 3 en la probeta A.

Escoria:

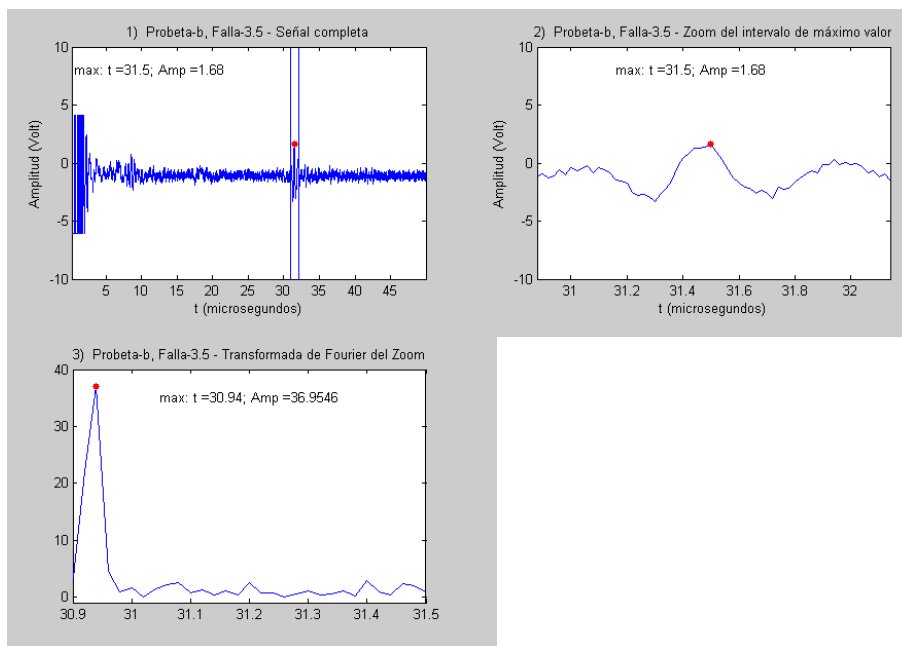


Figura 26: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 5 en la probeta B.

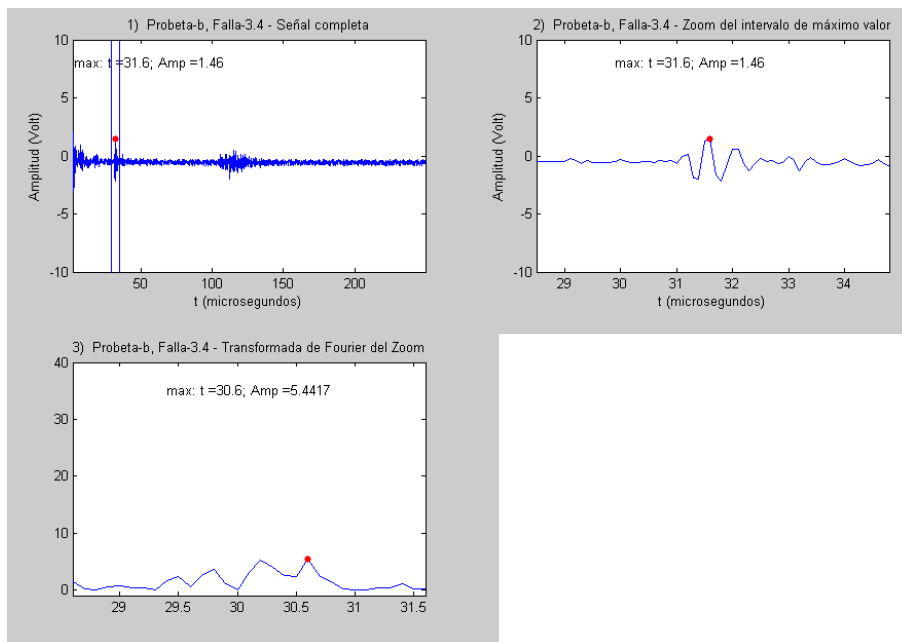


Figura 27: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 4 en la probeta B.

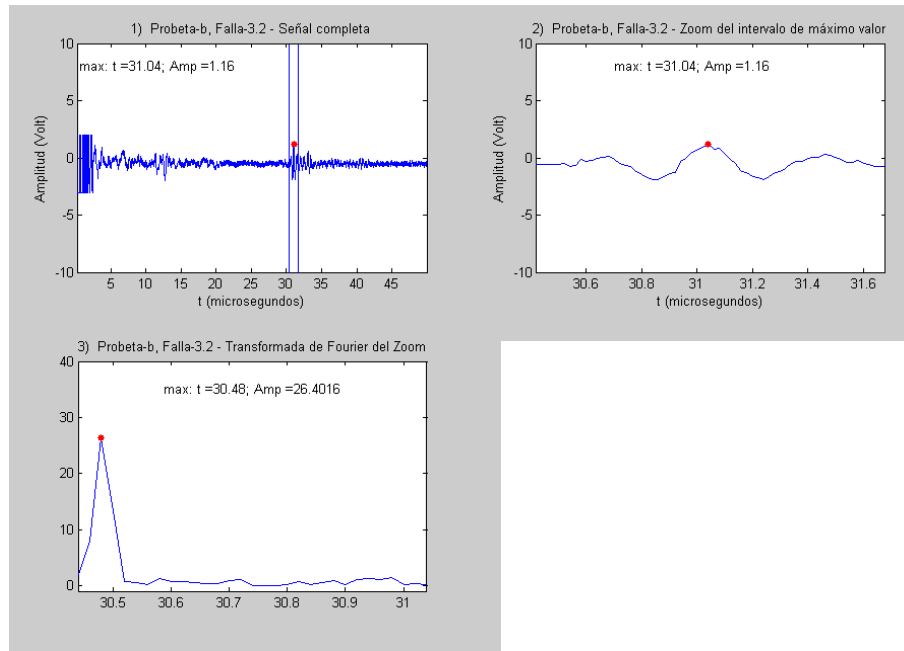


Figura 28: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 2 en la probeta B.

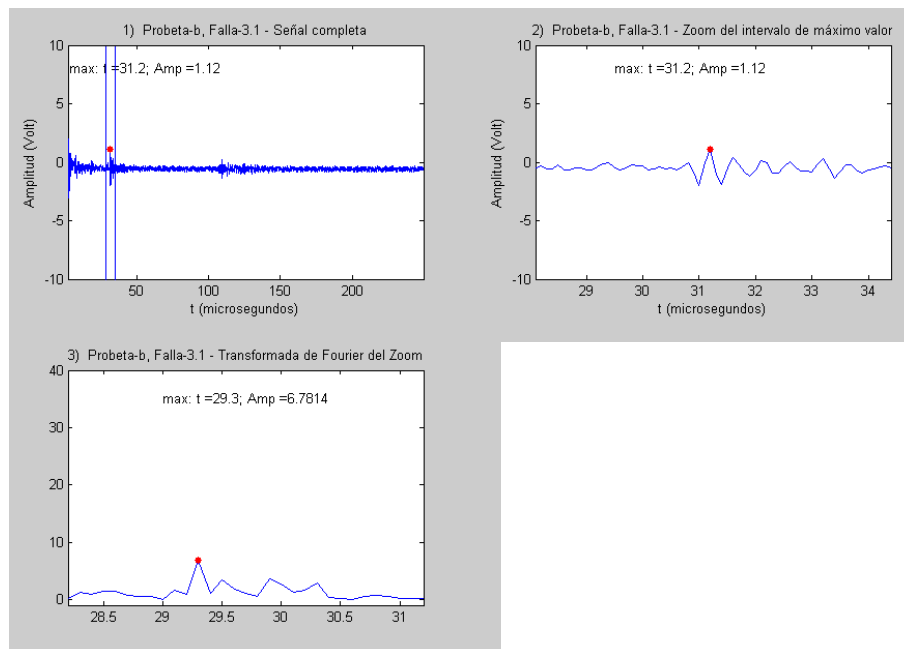


Figura 29: Gráficas de discontinuidad N° 3 vista 1 en la probeta B.

Poros:

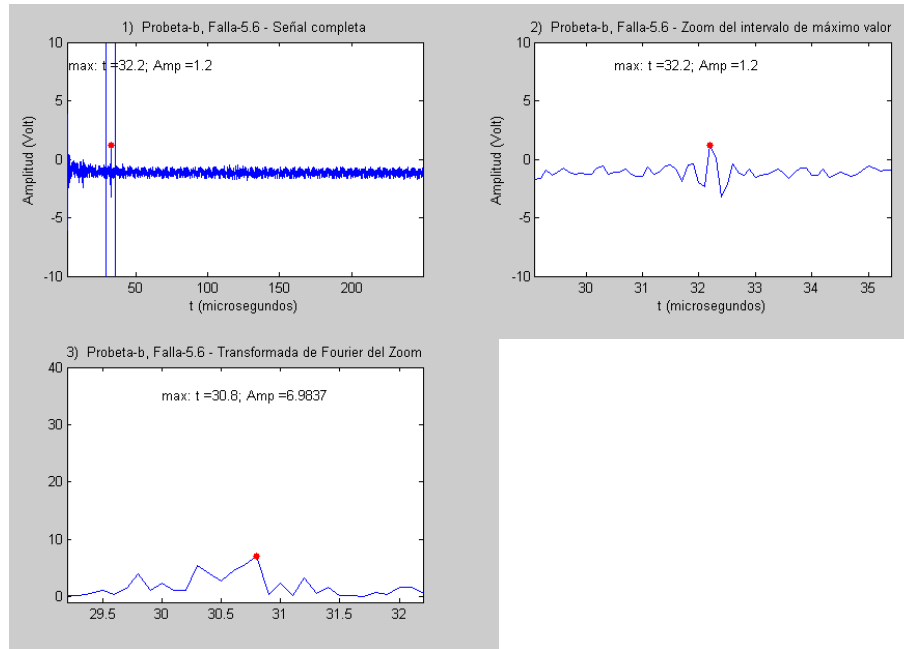


Figura 30: Gráficas de discontinuidad N° 5 vista 6 en la probeta B.

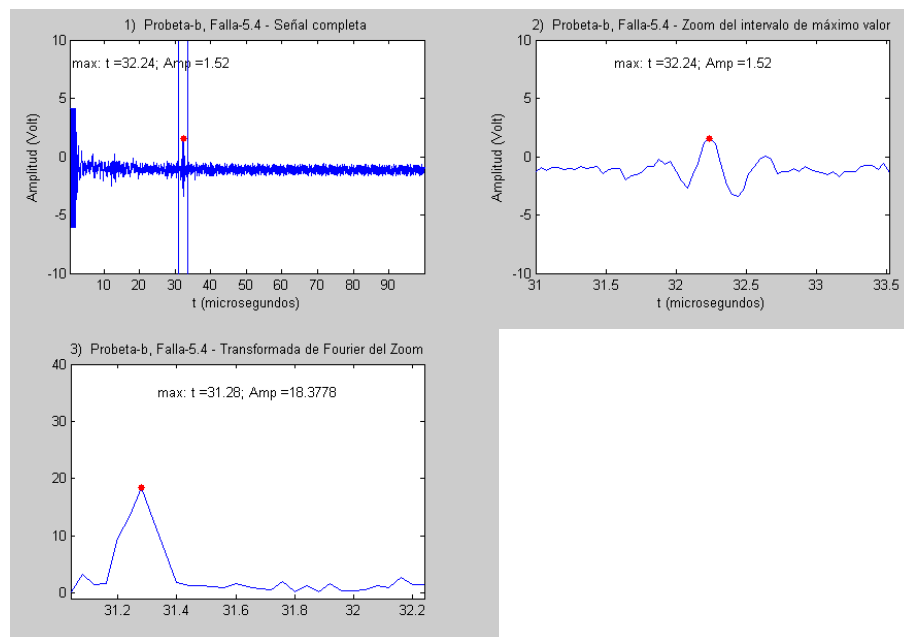


Figura 31: Gráficas de discontinuidad N° 5 vista 4 en la probeta B.

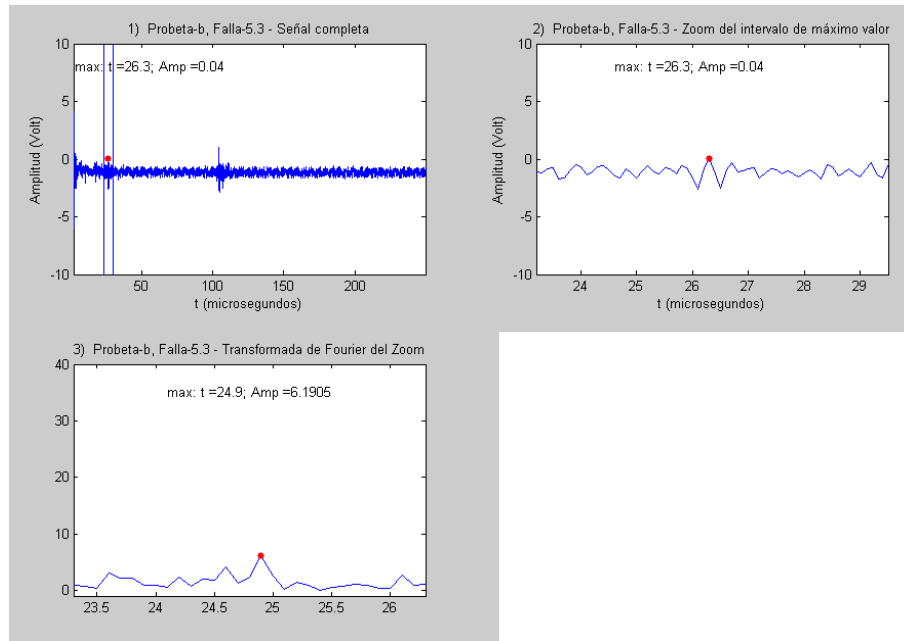


Figura 32: Gráficas de discontinuidad N° 5 vista 3 en la probeta B.

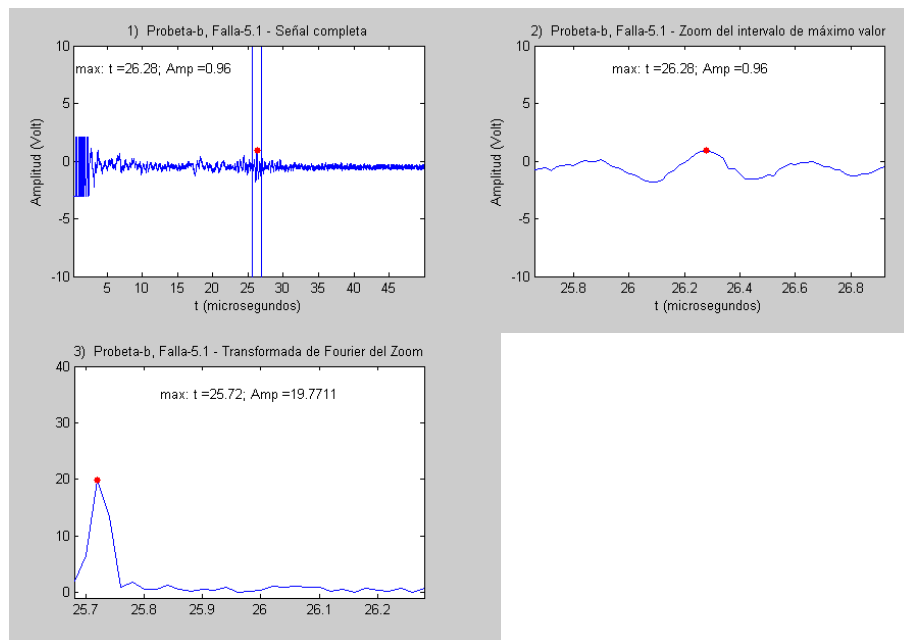


Figura 33: Gráficas de discontinuidad N° 5 vista 1 en la probeta B.

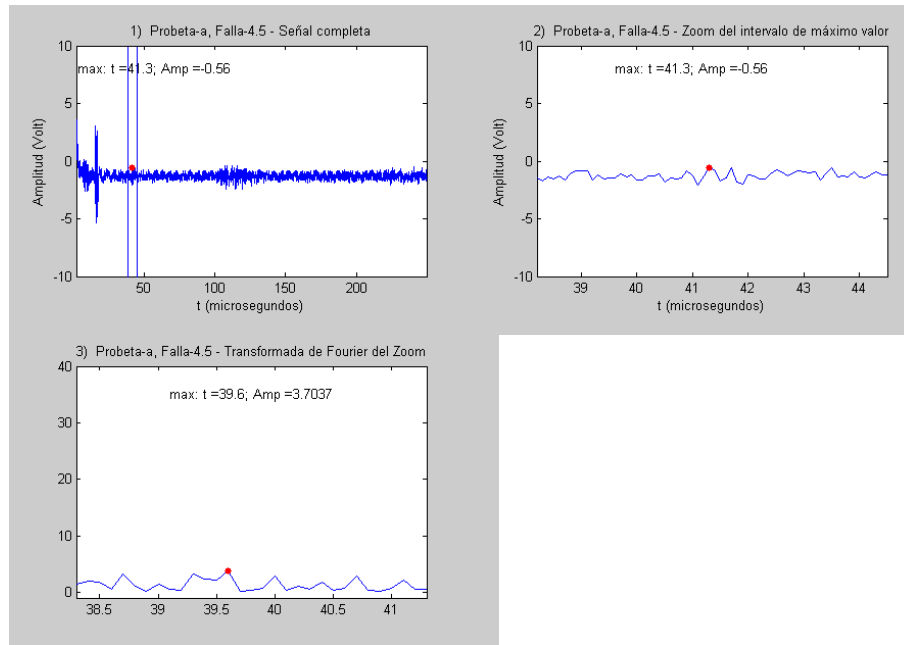


Figura 34: Gráficas de discontinuidad N° 4 vista 5 en la probeta A.

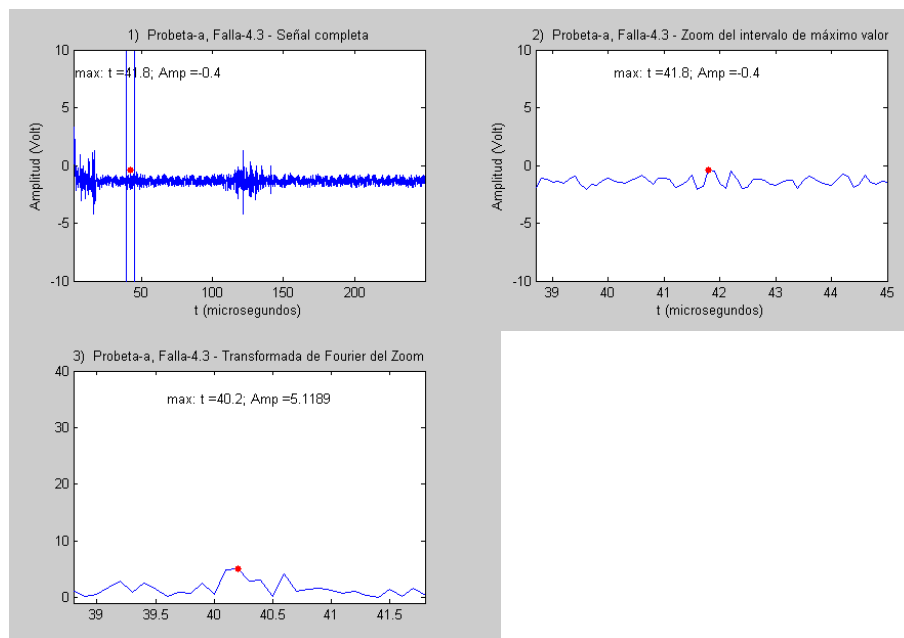


Figura 35: Gráficas de discontinuidad N° 4 vista 3 en la probeta A.

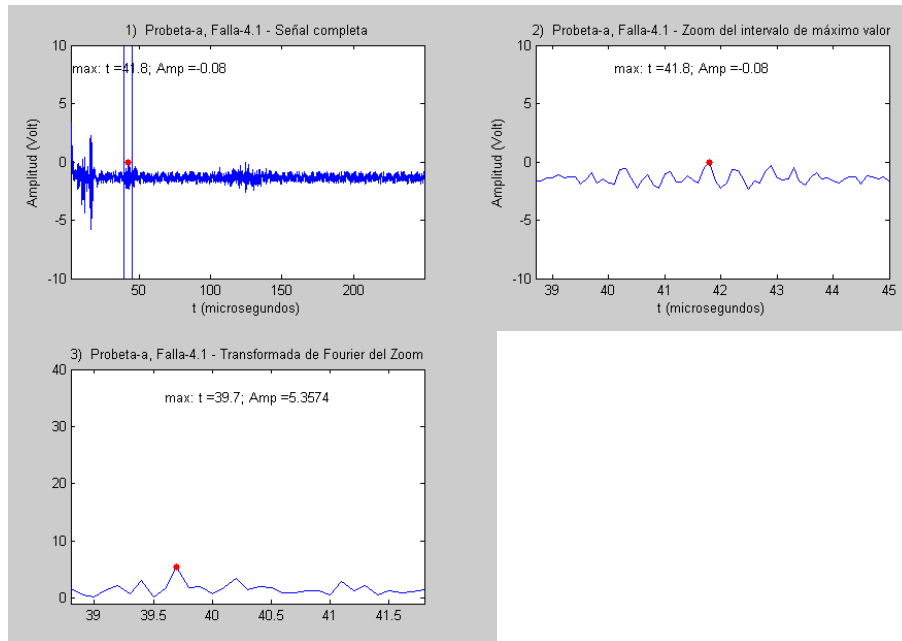


Figura 36: Gráficas de discontinuidad N° 4 vista 1 en la probeta A.

Al observar la ecodinámica de las señales pertenecientes al poro y a la falta de fusión, es posible distinguir un patrón, el cual tiende a repetirse con regularidad y el cual varía según el tipo de discontinuidad.

El patrón observado para las indicaciones denominadas falta de fusión es de picos pronunciados, los cuales se forman por un rápido crecimiento de la curva para encontrar el punto con mayor energía del eco y luego rápidamente decrecer. Esto se debe a las falta de penetración es un reflector del haz ultrasónico, el cual presenta una orientación preferencialmente perpendicular a la dirección de propagación de las ondas transversales, contribuyendo a un alta razón de reflexión.

Sin embargo, es importante destacar que debido a la falta de pericia de los operadores de las técnicas de ultrasonido industrial, se pueden generar confusiones debido a que en oportunidades se encuentran indicaciones, las cuales no siguen el patrón antes mencionado como se pueden apreciar en las figuras (18, 19, 20, 21), ya que muestran una menor amplitud del eco y la forma de las curvas no siguen un crecimiento rápido hacia el punto de mayor energía.

Para una misma sensibilidad expresada en decibeles (dB), las máximas reflexiones del haz ultrasónico y su consecuente respuesta; máxima altura del eco (señal respuesta) se presentan cuando la orientación de las faltas de penetración son perpendiculares a la orientación del haz (perpendicular al transductor piezoeléctrico).

Otra variable de importancia operacionalmente, es que se debe ejercer una presión constante (no necesariamente elevada) entre el transductor y la superficie de contacto. Debido a que una variación de la presión, producirá una variación de la altura de la señal respuesta, esto debe principalmente al acople entre las partículas del transductor – acoplante – superficie de contacto. Las consideraciones antes expuestas se cumplen para una orientación y dimensiones determinadas.

En cuanto a los poros, la ecodinámica que se muestra, describe curvas con un pico redondeado. La curva se incrementa suavemente hacia el punto de mayor energía del pulso. En términos generales, hacia ambos lados del punto de mayor amplitud de la señal, se presenta el mismo comportamiento de disminución de la amplitud.

Adicionalmente se observa que la amplitud de las señales de los poros es menor a las de las señales de la falta de fusión, lo cual es una consecuencia de la forma de la discontinuidad.

La tendencia a la formación de volúmenes esféricos de las discontinuidades tipo poro, provoca que el rayo ultrasónico al incidir sobre esta disminuya su energía originándose así una señal con menor amplitud. Debido a que las ondas al encontrar la superficie curva de los poros son desviados, como se puede apreciar esquemáticamente a continuación.

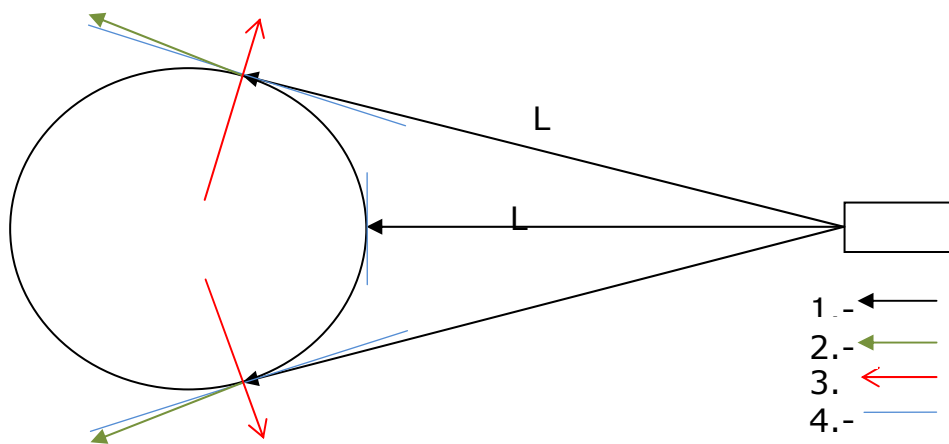


Figura 37. Representación esquemática de la incidencia del haz ultrasónico sobre un poro

Donde:

1. Haz ultrasónico incidente
2. Haz reflejado a un ángulo entre el plano tangente sobre el punto de incidencia del haz ultrasónico contenido en la superficie del poro y el haz reflejado (y/o incidente).

3. Normal al plano, sobre el punto de incidencia del haz ultrasónico contenido en la superficie del poro.
4. Plano tangente sobre el punto de incidencia del haz ultrasónico contenido en la superficie del poro.
- L1. Longitud del haz ultrasónico que incide perpendicularmente a la superficie del poro.
- L2. Longitud del rayo del haz ultrasónico a un ángulo diferente al perpendicular a la superficie del poro.

Por otra parte y debido a que el haz ultrasónico tiene que recorrer mayores distancias (L2 en la figura 37) a ángulos de incidencia diferentes al perpendicular (L1 en la figura 37), la energía reflejada es menor. Así mismo, parte de la energía de la onda se pierde debido a que la misma es reflejada como se puede apreciar en la figura anterior (Haz de color verde).

Como el ángulo entre L1 y L2 se incrementa hasta llegar a L2, la distancia aumenta produciendo mayor pérdida de energía, la cual es absorbida por el material, en forma de calor atenuando lentamente la señal. Lo antes expuesto produce una caída suave de la curva del eco ultrasónico.

Lo contrario ocurre con la indicaciones proveniente de falta de fusión que a pesar de ser una discontinuidad volumétrica, sus bordes (reflectores) son planos y solo cuando el haz ultrasónico encuentra una esquina, el rayo de mayor energía incide sobre esta produciendo un alto reflejo motivo por el cual las pérdidas de energía son muy pocas. Así la

señal recogida por el equipo de ultrasonido tendrá una mayor amplitud que la obtenida en las señales de los poros.

Adicionalmente como el área que favorece la reflexión es pequeña, provoca que el ancho de la indicación sea menor en comparación con el ancho de las indicaciones proveniente de los poros.

En el caso de las escorias no se observó un patrón común en las señales tomadas, sin embargo, sí se observó la misma característica que los poros en cuanto al crecimiento y decrecimiento de la curva lo que indica que este comportamiento se puede atribuir a las discontinuidades de tipo volumétrico y a la presencia de curvaturas semejante a las mostradas esquemáticamente en la figura anterior.

Con respecto a la transformada de Fourier se obtuvieron los siguientes intervalos de valores para cada una de las discontinuidades:

- Falta de fusión: [4,78; 16,97]
- Escoria: [5,44; 36,95]
- Poro: [3,70; 6,98]

Al observar los valores obtenidos aplicando las amplitudes mediante la Transformada de Fourier, se puede apreciar, que las escorias pueden ser identificadas siempre que los resultados obtenidos superen al límite superior de la falta de fusión.

Por otra parte, en combinación con la representación de la señal en radiofrecuencia y para procesos de unión por soldadura en los cuales no

se requieran la limpieza entre pases por la presencia de escoria, se puede diferenciar entre poros y falta de fusión, siempre y cuando el valor de la amplitud proveniente de la Transformada de Fourier sea superior al máximo obtenido para los poros. De manera semejante y sin la posibilidad de utilizar los parámetros obtenidos mediante la aplicación de la Transformada de Fourier, se pueden identificar los poros y las faltas de fusión, mediante la evaluación de la forma del eco y del tiempo de vuelo requerido para mostrar la indicación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La técnica de radiografía industrial facilita la ubicación de las discontinuidades en la pieza a inspeccionar.
- La técnica de radiografía industrial deja un registro permanente y visual de las discontinuidades en la pieza a inspeccionar.
- Mediante el estudio de la ecodinámica de las señales del ultrasonido es posible obtener información de la falla que se encuentra en la pieza a inspeccionar.
- Mediante la aplicación de programas computacionales, es posible facilitar la interpretación y subsiguiente identificación de los resultados de la técnica de ultrasonido industrial.
- La ecodinámica de un poro se caracteriza por tener forma redondeada. La cual disminuye lentamente desde el centro de mayor energía hacia los extremos.
- La ecodinámica de una falta de fusión se caracteriza por ser una curva cuyo crecimiento tiende a ser rápido en busca del punto de mayor energía y después disminuye lentamente.
- El valor de la amplitud da una idea del tipo de falla que se presenta.
- El valor máximo de la transformada de Fourier es mayor para la falta de fusión que para los poros.

- El valor de la transformada de Fourier para las escorias es mayor que para la falta de fusión y para los poros.
- El valor máximo de la transformada de Fourier para el poro se encuentra en el intervalo [3,70; 6,98].
- El valor máximo de la transformada de Fourier para la falta de fusión se encuentra en el intervalo [4,78; 16,97].
- El valor máximo de la transformada de Fourier para la escoria se encuentra en el intervalo [5,44; 36,95].
- Es necesario partir de un número superior de juntas soldadas para poder conseguir una mayor cantidad y una variedad más adecuada para el estudio.
- El valor de la amplitud del punto máximo de la transformada de Fourier de los poros, escoria y de la falta de fusión se solapan, siendo la zona de solape descartada para la clasificación de las discontinuidades mediante el uso de la transformada de Fourier.

Recomendaciones

- Realizar los ensayos de radiología industrial y contrastar con ultrasonido industrial a un número superior de probetas, con el objetivo de obtener resultados de mayor precisión.
- Realizar los ensayos de radiología industrial y contrastar con ultrasonido industrial a una mayor variedad de fallas.
- Controlar la presión ejercida sobre el transductor al tomar las señales para así asegurar que las condiciones del ensayo sean siempre iguales.
- Estudiar la viabilidad de la aplicación de otras técnicas de procesamiento de datos.
- Estudiar la influencia del número de puntos que conforman la señal tratada sobre los resultados obtenidos en la transformada de Fourier.
- Realizar el estudio empleando una mayor frecuencia de muestreo.
- Considerar otras técnicas de adquisición de datos, para la captura de señales del equipo de ultrasonido.
- Realizar el estudio con probetas sanas y compararlas con las probetas con cordones de soldadura defectuosos para así poder conocer los picos que arrojan la señal de la probeta sana.
- Realizar el estudio empleando transductores de menores diámetros.
- Realizar el estudio empleando transductores ultrasónicos de mayor frecuencia nominal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. , Joseph W. & Weeks, William (1998). *Técnica y práctica de la soldadura*. Barcelona, España: Editorial Reverté.
2. Finolh, L. (S/F) *Manual de soldadura eléctrica por arco*. Instituto tecnológico de soldadura. Centro técnico de adiestramiento. AGA venezolana C.A.
3. Ichaso, A., Pereira, D., & Serrano, C. (2000). *Curso de Ultrasonido* (Nivel 1). Caracas: Universidad Central de Venezuela.
4. ANSI/AWS A3.0: (2001). *Standard Welding Terms and Definitions*. American Welding Society, 550 N.W. LeJeune Road, Miami. FL 33126.
5. Ramirez Gomez, F., Fernandez Soler, M. A., Roldán, A. A., Delojo Morcillo, G., Valdecantos Martinez, C., & De los Rios Rubalcaba, J. M. (1980). *Introducción a los métodos de los ensayos no destructivos*. Instituto Nacional de Técnicas Aero Espacial. Madrid.
6. Amorer, L. a. (2005). *Curso de Ultrasonido nivel 2*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
7. Echeverria, R. (2002). *Ultrasonido*. Buenos Aires: Universidad Nacional del Comahue.
8. Sears, F. W. (1949). *Optics* (3rd ed.). Massachusetts: Addison-Wesley.
9. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (1975). *Digital Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
10. Proakis, J., & Manolakis, D. (1998). *Tratamiento digital de Señales*. Madrid: Prentice-Hall.
11. G, A. F. (S/F) *El proyecto de investigación*. Editorial Episteme.

12. Great Britain Welding Institute. (1979). Size Measurement and Characterisation of Weld Defects by Ultrasonic Testing.
13. Hellier, C. (2001). Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw Hill.
14. I Szilard, J. (1982). Ultrasonic Testing. New York: John Wiley & Sons, Ltd.
15. Inc., T. M. (1996). Matlab Signal Processing Toolbox.
16. Kalpakjian, S. (S/F) Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Mexico: Pearson Educación de Mexico.
17. Krautkramer, J., Krautkramer, H., & Krautkramer, S.-V. (1990). Ultrasonic Testing of Material.
18. American Society of Metals. (1993). Metals Handbook. Welding, brazing and soldering (Vol. 6). Ohio.
19. Reina, M. (1988). Soldadura de los aceros. Aplicaciones. Madrid: Gráficas Lormo.
20. Society, A. W. (1995). The practical reference guide for radiographic inspection. Acceptance criteria. Miami.
21. Sulbaran, I. G. (2003). Ecodinámicas de defectos conocidos encontrados en cordones de soldaduras de planchas de aceros al carbono. Caracas.
22. American Society for Nondestructive Testing. NonDestructive Testing Handbook. Ultrasonic Testing. Third Edition. Columbus, Oh 43228-0518. USA
23. Banks, B., Oldfield, G.E. & Rawding, H. (1992). Ultrasonic flaw detection in metals. London: Illife Books LTD.

24. ANSI/AWS A5. 1-91 Spec for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. American Welding Society, 550 N.W. LeJeune Road, Miami. FL 33126.

ANEXO

Programa elaborado para el análisis de las señales del ultrasonido.

```
function f = procesar(nombre)

data = load(nombre);

t1 = 1e+6*data(:,1); %tiempo de la muestra multiplicado por
1Meg

a1 = data(:,2);      %valor de la señal en decibeles - señal
original

g = t1(1);
gg = t1(2);
ggg = 1/(gg-g);

%nombre de la gráfica

nombre_figura = strcat('Probeta-',nombre(1),',', Falla-
',nombre(5),'.',nombre(6));

pos = get(0,'ScreenSize');
ancho = 4;
barra = 110;

pos(1) = pos(1) + ancho;
pos(2) = pos(2) + barra;
pos(3) = pos(3) - 2*ancho;
pos(4) = pos(4) - barra;

figure('Position', pos); %creación de una figura nueva
```

```

%grafica de la señal completa
subplot (2, 2, 1); %1er cuadro del conjunto de gráficos
plot(t1,a1);
title(['1) ',nombre_figura, ' - Señal completa']);
xlabel('t (microsegundos)')
ylabel('Amplitud (Volt)');
%ylabel(ggg)
axis([t1(1) t1(numel(t1)) -10 10]);

%salto del osciloscopio, ubicación de los picos requeridos
inicio = find(t1==20);
fin = find(t1==45);
a2 = a1(inicio:fin);
t2 = t1(inicio:fin);

%picos de la señal sin el ruido inicial del osciloscopio
ind = find(a2==max(a2));

%notas de los valores picos de la señal
hold on;
plot(t2(ind),a2(ind),'.r','MarkerSize',15);

```

```

maximo = strcat('max: t = ', num2str(t2(ind)),'; Amp =
',num2str(a2(ind)));
text(t1(15),8,maximo,'HorizontalAlignment','left');

%graficas de los delimitadores del zoom
inicio = ind - 31;
fin = ind + 32;
plot([t2(fin) t2(fin)],[-10 10]);
plot([t2(inicio) t2(inicio)],[-10 10]);

%grafica del zoom
subplot (2, 2, 2);
t2 = t2(inicio:fin);
a2 = a2(inicio:fin);
[Pxx,w] = pwelch(a2);
%pitch ind = find(a2==max(a2));
plot(t2,a2);
hold on;
plot(t2(ind),a2(ind),'.r','MarkerSize',15);
text(t2(15),8,maximo,'HorizontalAlignment','left');
title(['2) ',nombre_figura, ' - Zoom del intervalo de máximo
valor']);
xlabel('t (microsegundos)');

```

```

ylabel('Amplitud (Volt)');
axis([t2(1) t2(numel(t2)) -10 10]);

%gráfica de la transformada de furier
subplot(2, 2, 3);
a2 = real(fft2(a2));
a2 = a2(2:round(numel(a2)/2));
t2 = t2(2:round(numel(t2)/2));
a2(:)=abs(a2(:));
plot(t2,a2);
ind = find(a2==max(a2));
maximo = strcat('max: t = ', num2str(t2(ind(1))),'; Amp = ',num2str(a2(ind(1))));
hold on;
plot(t2(ind),a2(ind),'.r','MarkerSize',15);
text(t2(round(numel(t2)/2)),35,maximo,'HorizontalAlignment','center');
title(['3) ',nombre_figura, ' - Transformada de Fourier del Zoom']);
axis([t2(1) t2(numel(t2)) -1 40]);

%gráfica del pitch para el proceso de señales
subplot (2, 2, 4)

```

```
a2 = Pxx(10:length(Pxx));  
t2 = w(10:length(Pxx));  
plot(t2,a2);  
hold on;  
title(['4) ',nombre_figura, ' - Potencia de la señal en el  
Zoom']);  
axis([0.75 3.00 -0.1 2]);
```


APÉNDICE

Discontinuidades presentes en la soldadura

A continuación se describen algunas de las discontinuidades que afectan la calidad de la soldadura:

- Porosidad: las porosidades tienen forma esférica alargada y pueden encontrarse en la superficie ó en formas subsuperficiales. Es producto de los gases desprendidos durante la fusión del área soldada y atrapados durante su solidificación, reacciones químicas durante la soldadura o por contaminantes.
- Inclusiones de escoria: las inclusiones de escoria tienen forma irregular y no se orientan en una dirección determinada. Son compuestos como óxidos, fundentes y materiales de recubrimientos de electrodos que quedan atrapados en la zona de la soldadura. La contaminación por el ambiente también puede contribuir a estas inclusiones.
- Falta de fusión y penetración incompletas: la fusión incompleta ocurre cuando el metal de aporte falla en fundirse con el metal base. La penetración incompleta se presenta cuando es insuficiente la profundidad de la unión soldada.
- Sopladura: Cavity formada por gas atrapado.
- Picadura: Sopladura de pequeña dimensión que emerge a la superficie de la soldadura.
- Rechupe: Cavity debida a la contracción del metal durante la solidificación.

- Perforación: Hundimiento del baño de fusión que da lugar a un agujero en la soldadura o en un lateral de la misma.
- Mordedura: Falta de metal, en forma de surco de longitud variable, en cualquiera de los bordes de un cordón de soldadura.
- Socavamiento: se debe a la fusión y al alejamiento del metal de base y la generación consecuente de un surco con la forma de una penetración ó muesca.
- Falta de alineación: Falta de alineación entre dos piezas soldadas que no se encuentran en el mismo plano, sino en dos paralelos.
- Salpicaduras o excesos de material: Gotas de metal fundido proyectadas durante el soldeo y que se adhiere sobre el metal base o sobre el metal de soldadura ya solidificado.
- Grietas: por lo general son el resultado, de una combinación de los siguientes factores:
 - o Gradientes de temperatura que causan esfuerzos térmicos en la zona de la soldadura.
 - o Variaciones en la composición en la zona de la soldadura, que causan distintas velocidades de contracción.
 - o Fragilización de los límites de grano, causada por la segregación de elementos como el azufre a los límites de grano.
 - o Fragilización por hidrógeno.

Las grietas se pueden presentar en varios lugares y direcciones del área de la soldadura. Los tipos característicos de grieta son longitudinales, transversales, en cráter, bajo el cordón y junto al cordón.

- Daño superficial: ocurre cuando los metales salpican durante la soldadura y se depositan en forma de pequeñas gotas sobre las superficies adyacentes.
- Esfuerzos residuales: ocurre por el calentamiento y enfriamiento localizado durante la soldadura, la dilatación y contracción del área de unión.

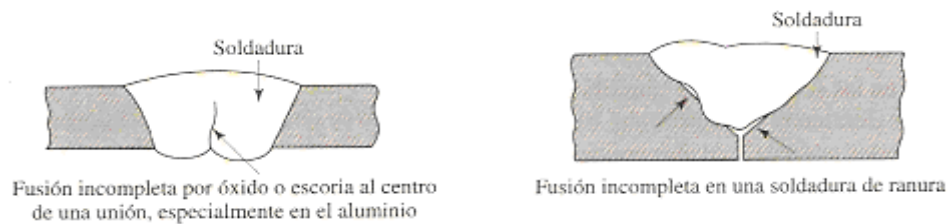


Figura 38. Cordones de soldadura de baja calidad, resultado de fusión incompleta
Fuente: 16

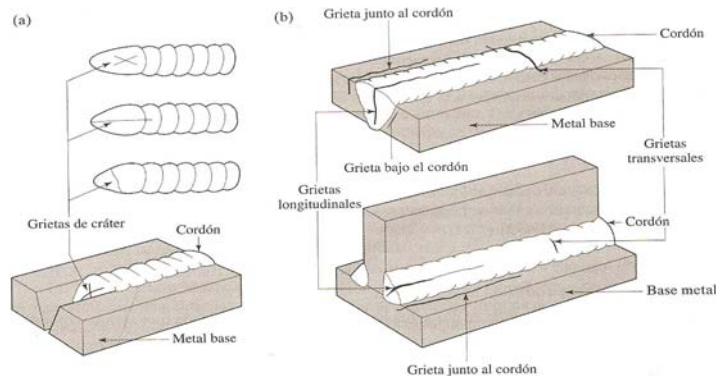


Figura 39. Tipos de grietas en uniones soldadas, debidas a esfuerzos térmicos que se desarrollan durante la solidificación y la contracción del cordón de soldadura y la estructura que la rodea. (a) Grietas de cráter. (b) Varios tipos de grietas en uniones a tope y en T

Fuente: (16)

Propiedades de los materiales:

- Cohesión: Resistencia que oponen las moléculas de los materiales a separarse unas de otras.
- Ductilidad: Capacidad de los materiales para deformarse cuando se les aplica un esfuerzo de tracción.
- Dureza: Resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado por otro.
- Elasticidad: Capacidad de un material de recuperar su estado inicial cuando cesa la causa que lo deformó.
- Fatiga: Resistencia a la rotura de un material sometido a esfuerzos variables tanto en magnitud como en sentido.
- Fragilidad: Capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación.
- Maleabilidad: Capacidad de los materiales de deformarse plásticamente frente a esfuerzos de compresión.
- Plasticidad: Capacidad de algunos materiales sólidos de adquirir deformaciones permanentes sin llegar a romperse.
- Resilencia: Capacidad de un material de absorber energía en la zona elástica al someterlo a un esfuerzo de rotura.

Conceptos básicos de la acústica

Para entender los fenómenos que ocurren cuando se aplica la técnica de ultrasonido industrial es necesario considerar algunos conceptos básicos de la acústica. Se deben conocer conceptos elementales como oscilación, ondas y otros. A continuación se recogen algunos de los más importantes.

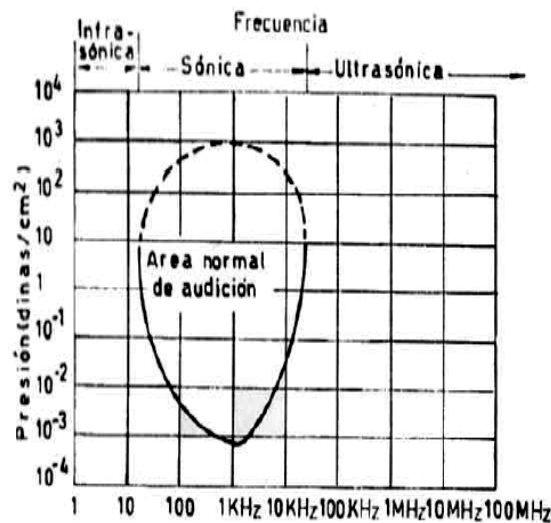


Figura 40. Espectro de Acústico
Fuente: (10)

Oscilación: Es el cambio periódico de condición ó comportamiento de un cuerpo.

Período: Es el tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación, es decir, el tiempo en que un cuerpo se mueve un ciclo completo relacionado al momento de estados idénticos.⁽²⁾

Frecuencia de la Onda (f): Es el número de oscilaciones de una partícula por segundo.

Amplitud de Oscilación (A): Es la máxima desviación del cuerpo oscilante desde la posición de equilibrio.

Velocidad Instantánea de Vibración (v): Es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio.

Fase: Es la condición instantánea en una oscilación. También es denominado diferencia ó desplazamiento de fase.

Amortiguación: Es el decremento en el tiempo de la amplitud de una oscilación.

Onda: Es la propagación de una oscilación la cual sucede cuando una partícula oscila transmitiendo su vibración a la adyacente. La partícula adyacente tiene una diferencia de fase constante. El gráfico de una onda es similar al de una oscilación, pero contra una distancia en lugar del tiempo.

Longitud de Onda (λ): Es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia. El período y la longitud de onda están relacionados, pues el período es el tiempo que toma una partícula en recorrer una longitud de onda.

Onda longitudinal y onda transversal: La onda longitudinal es aquella que provoca oscilaciones en la dirección de la propagación mientras que la onda transversal es aquella cuyas oscilaciones se realizan en dirección transversal al haz de propagación.

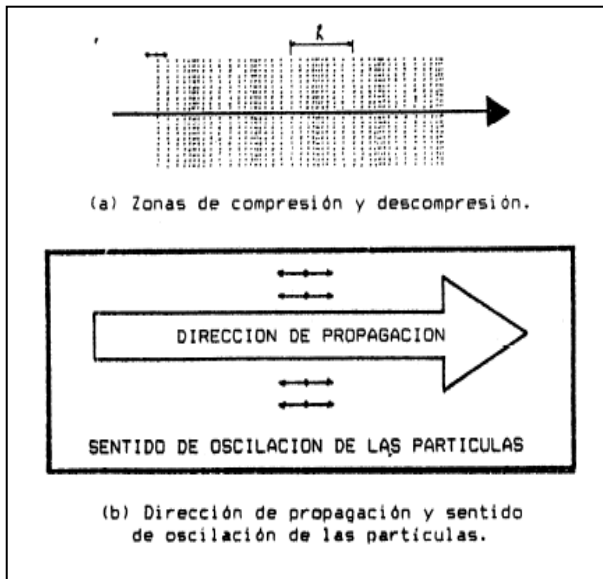


Figura 41. Características de las Ondas Longitudinales

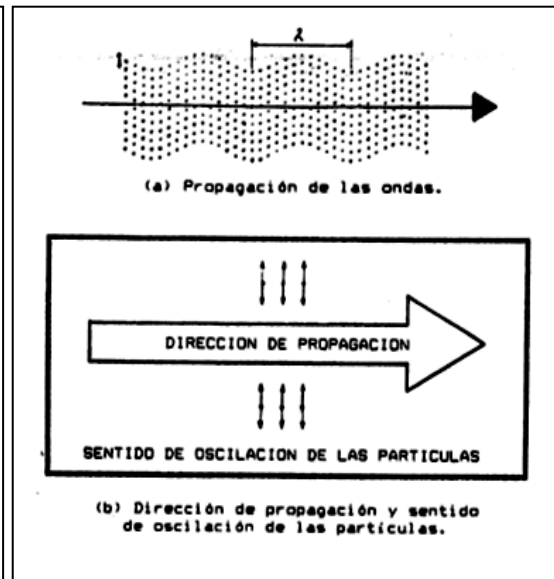


Figura 42. Características de las Ondas Transversales

Fuente: (6)

Velocidad Acústica (c): Es una propiedad del material, se puede definir como la distancia recorrida por las ondas en un medio en una unidad de tiempo, es decir, es la velocidad de propagación del sonido en un medio; generalmente es constante para cada material dado, para cualquier frecuencia y cualquier longitud de onda. Sin embargo, esto último no es necesariamente cierto, pues la velocidad acústica depende, particularmente en los gases y líquidos, de la presión y temperatura entre otros parámetros. En muchos materiales sólidos, tales como los metales, es posible despreciar esta influencia; tomando esta velocidad

aproximadamente como una constante del material, lo cual resulta bastante útil en los ensayos por Ultrasonido.

Dispersión: Es un fenómeno que ocurre cuando el tamaño del obstáculo posee el mismo orden de magnitud que el de la longitud de onda. El proceso de propagación, es débilmente interferido, aunque algo de energía es absorbida. Esta energía se extiende como una nueva onda esférica en todas direcciones, con el obstáculo como punto central.⁽²⁾

Difracción: Cuando el obstáculo es más grande que la longitud de onda, este posee una impedancia acústica diferente de los alrededores, se producirá una reflexión de la onda en el mismo.⁽²⁾

Interferencia: Es un efecto que se presenta cuando una nueva onda reflejada se superpone con la original tal que, dependiendo de las fases de ellas, se puede producir un refuerzo, un debilitamiento, ó una completa anulación.⁽²⁾

Atenuación del haz: Es la pérdida de energía de una onda ultrasónica al desplazarse a través de un material. La atenuación del haz principalmente es causada por la dispersión y la absorción.

Presión Acústica (P): Es definida como la presión alterna de un material dado (sean gases, líquidos y sólidos). En los puntos de gran densidad de partículas, la presión es también mayor que la presión nominal, mientras que en la zona dilatada es menor.