



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

**Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica**

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS MEDIANTE ULTRASONIDO EN EQUIPOS TERMICOS

Seminario de Título presentado en
conformidad a los requisitos para
obtener el título de Ingeniero de
Ejecución en Mecánica.

**Profesor Guía:
Sr. Juan Carlos Figueroa Barra**

**Sergio Andrés Castillo González
Matías Javier Inostroza Hernández**

2013

I. AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS.

Agradecer a mis padres y hermana por
el apoyo que me dieron estos años de universidad.

Además de mi polola, amigos, compañeros,
por tantos momentos juntos.

Matías.

Agradecer a mi madre y hermanos,
quienes fueron fundamental para culminar
mi proceso de estudios.

Sergio.

II. RESUMEN

El presente estudio da a conocer desde conceptos básicos a algunos más específicos del ultrasonido, como es la propagación de ondas en medios isotrópicos. Esto con el propósito de comprender el principio de funcionamiento de un equipo ultrasónico, y posteriormente realizar un ensayo no destructivo por ultrasonido a un equipo térmico bajo la norma ASME.

El ultrasonido en un ensayo no destructivo es aplicado para conocer el interior de un material, procesando la trayectoria de la propagación de ondas sonoras emitidas. Es conocido que la propagación de estas ondas a través de un medio isotrópico dependerá de las discontinuidades del material ensayado, lo que permite evaluar la forma, tamaño y orientación de la falla, ya que estas anomalías oponen cierta resistencia conocida como impedancia.

Finalmente en este seminario se aplica un END a la tapa posterior de una de las calderas del Hospital Naval de Talcahuano. Para dicho ensayo se utilizó el equipo de ultrasonido industrial de la serie EPOCH 1000i del laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Bío Bío, sede Concepción; determinando que la tapa de la caldera se encuentra en óptimas condiciones.

iii. NOMENCLATURA

| | |
|-----------|---|
| A | Amplitud. mm |
| A_R | Amplitud (Reflejada). mm |
| A_T | Amplitud (Transmitida). mm |
| c_L | Velocidad longitudinal. m/s |
| c_O | Velocidad de la onda de propagación. m/s |
| c_p | Velocidad de fase. m/s |
| c_T | Velocidad tangencial. m/s |
| c_1 | Índice de refracción medio 1. |
| c_2 | Índice de refracción medio 2. |
| ds | Longitud de arco. |
| dx | Longitud. Mm |
| F | Tensión. |
| f | Frecuencia. Hz |
| I | Intensidad de onda. W/m^2 |
| I_I | Intensidad de onda (Incidente). |
| I_R | Intensidad de onda (Reflejada). |
| I_T | Intensidad de la onda. (Transmitida) |
| k | Numero de onda. |
| m | Masa. kg |
| n | Número de medios. |
| $q(x, t)$ | Fuerza del cuerpo o carga externa por unidad de longitud. N |

| | |
|---------------|-----------------------------------|
| ε | Tensor. |
| λ | Longitud de onda. Mm |
| ν | Coefficiente de Poisson. |
| ρ | Densidad kg/m ³ . |
| φ | Angulo de fase. |
| ϕ | Función potencial escalar. |
| ψ | Función potencial vectorial. |
| ω | Frecuencia circular. |
| R | Coefficiente de reflexión. |
| T | Coefficiente de transmisión. |
| t | Unidad de tiempo s. |
| u_x | Desplazamiento en la dirección x. |
| u_y | Desplazamiento en la dirección y. |
| T | Impedancia acústica. |

IV. INDICE

| Capítulos | Página |
|--|-----------|
| 1. Ensayos no destructivos | 1 |
| 1.1. Tipos de ensayos no destructivos | 4 |
| 1.1.1. Inspección Visual | 4 |
| 1.1.2. Líquidos y Partículas Penetrantes (LP) | 6 |
| 1.1.3. Partículas Magnéticas | 8 |
| 1.1.4. Ultrasonido | 9 |
| 1.1.5. Radiografía Industrial | 11 |
| 1.1.6. Método de Corriente Inducida | 13 |
| 2. Ultrasonido | 15 |
| 2.1. Principios acústicos básicos | 16 |
| 2.1.1. El Sonido | 16 |
| 2.1.2. Sonido Continuo | 16 |
| 2.1.3. Sonido de Impulso | 16 |
| 2.2. Parámetros del sonido | 17 |
| 2.2.1 Intensidad | 17 |
| 2.2.2. Tono | 17 |
| 2.2.3. Timbre | 17 |
| 2.3. Onda sonora | 17 |
| 2.3.1. Periodo | 18 |
| 2.3.2. Frecuencia | 19 |
| 2.3.3. Amplitud | 19 |
| 2.3.4. Longitud de Onda | 19 |
| 2.4. Atenuación o amortiguación de onda | 20 |
| 2.5. Dispersión | 20 |
| 2.6. Velocidad de propagación | 20 |
| 2.7. Presión acústica | 21 |
| 3. Propagación de ondas en medios elásticos | 22 |
| 3.1. Propagación de ondas en medios infinitos | 22 |
| 3.2. Ecuación | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Reflexión y refracción | 27 |
| 4.1. Introducción | 27 |
| 4.2. Comportamiento normal de los factores que inciden en la reflexión | 27 |
| 4.3. Ley de Snell | 34 |
| 5. Ultrasonido en medición de espesores en equipos térmicos | 38 |
| 5.1. Principio del Ultrasonido | 38 |
| 5.2. Conceptos Fundamentales para un ensayo con Ultrasonido | 39 |
| 5.2.1. Impedancia acústica | 39 |
| 5.2.2. Atenuación | 40 |
| 5.2.3. Frecuencia (el Espectro) | 41 |
| 5.2.4. Efecto piezoeléctrico | 41 |
| 5.2.5. Palpador | 41 |
| 5.3. Código ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) | 42 |
| 6. Normas para medición de espesores en equipos térmicos | 44 |
| 6.1. T-534 bloques de calibración | 48 |
| 6.3. T-563 Confirmación de la calibración | 50 |
| 6.4. T-563.3.2 Ajustes de sensibilidad | 51 |
| 6.5. T-564 Calibración complementaria para exámenes con haz angular | 52 |
| 7. Descripción y calibración del equipo Epoch 1000i | 53 |
| 7.1. Olympus Epoch 1000i | 53 |
| 7.1.2. Características principales | 54 |
| 7.1.3. Referencias del equipo | 55 |
| 7.1.4. Principales industrias y aplicaciones | 55 |
| 7.2. Detector avanzado de defectos, con representaciones Phased Array herramienta estándar en el Epoch 1000i | 56 |
| 7.3. Especificaciones de los ultrasonidos Phased Array del Epoch1000i | 56 |

| | |
|--|-----------|
| 7.4. Palpadores phased array del EPOCH 1000i | 57 |
| 7.5. Cambio rápido entre los ultrasonidos convencionales y los Phased Array | 57 |
| 7.6. Curvas DAC/TVG estándares para todas las leyes focales | 57 |
| 7.7. Normas de inspección de soldaduras AWS | 58 |
| 7.8. Imagen simultánea del A-scan y S-scan | 58 |
| 7.9. Calibración del equipo | 58 |
| 7.9.1. Calibración con un transductor recto | 59 |
| 8. Mediciones experimentales en el equipo térmico | 64 |
| 8.1. Etapas y áreas de examen | 66 |
| 8.1.2. Diámetro del recipiente número de lecturas (mínimo) | 66 |
| 8.1.3. Marcado de Puntos de Inspección | 67 |
| 8.2. Desarrollo de la inspección | 68 |
| 8.2.1. Preparación de las Superficies | 68 |
| 8.3. Tabla t-522. Variables de un procedimiento de investigación por ultrasonido | 70 |
| 8.4. Resultados del equipo | 74 |
| 8.5. Conclusiones de los resultados obtenidos al realizar el examen de ultrasonido | 90 |
| 8.6. Políticas del procedimiento | 91 |

VII. CONCLUSION

VIII. FUENTES DE INFORMACION Y BIBLIOGRAFIA

V. INTRODUCCION

La confiabilidad de los ensayos no destructivos depende en gran medida de los conocimientos y habilidad de los individuos que la realizan. Por este motivo se debe prestar especial atención, a la capacitación y adquisición de experiencia de los inspectores.

Los ensayos no destructivos juegan un rol primordial en los planes de mantenimiento de las plantas industriales. El poder conocer el estado de una pieza, ya sea externa o internamente, realizando una inspección sin necesidad de deteriorarlos, ayuda a predecir la existencia de fallas catastróficas en una pieza o equipo crítico de la planta, minimizando así los tiempos muertos o de para, lo que permite evitar pérdidas económicas para la empresa.

En el presente seminario se realizará un recorrido desde los conceptos más básicos hasta los más sofisticados de lo que compete a los ensayos no destructivos, haciendo énfasis en el ensayo de ultrasonido, específicamente en el análisis, normativa y medición de espesores en equipos térmicos.

El ultrasonido es aplicado como una técnica más de ensayo no destructivo, siendo de gran ayuda a otros métodos como lo son el análisis de vibraciones, termografía, tintas penetrantes, partículas magnéticas, etc. Todos estos ensayos colaboran para lograr una mayor eficiencia en la industria, principalmente en lo que respecta al mantenimiento de equipos.

Como principio, el ensayo con ultrasonido, se conoce como un método de inspección donde se transmiten a velocidades constantes las señales de ultrasonido a través del material a examinar, y la captación de un eco producido cuando existe una falla en el material. Este planteamiento fue propuesto por el Dr. Floy Firestone en el año 1945, y es ingresado en la aplicación industrial por el Dr. Elmer Sperry en 1947.

Este seminario se enfocará en la revisión detallada del CODIGO ASME, estudiando específicamente el artículo V, donde se explica en detalle lo relacionado con los ensayos no destructivos, dando una pauta de cómo llevar a cabo un ensayo óptimo certificado por esta norma.

El análisis se llevará a cabo a una de las calderas del Hospital Naval de Talcahuano a través del equipo de ultrasonido marca OLYMPUS, de la serie EPOCH 1000i, facilitado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Bío-Bío, el cual es portátil, de tecnología de última generación para ensayos no destructivos de ultrasonido, lo que permite detectar fallas en soldaduras, tubos, y distintos equipos, gracias a sus dos tipos de modos, que son el convencional (UT) y phased array (PA). Una de las mayores ventajas operacionales de este equipo es que proporciona una frecuencia máxima de repetición de impulso de 6.000 Hz para efectuar escaneos de alta velocidad, además de poseer más de 30 filtros digitales.

Antes de realizar el ensayo a la caldera se debe cumplir con la normativa que el CODIGO ASME menciona. Para esto se necesitará tener control del equipo de ultrasonido, realizar la calibración adecuada, además de seleccionar de manera correcta el modo a ocupar, y el tipo de palpador a utilizar. De esta manera se podrá llevar a cabo el ensayo para poder predecir algún tipo de falla que este equipo presente o pueda presentar.

VI. OBJETIVOS

Objetivo general

- Aplicación de los ensayos no destructivos mediante la técnica de ultrasonido a equipos térmicos.

Objetivos específicos

1. Estudio de normas que rigen los ensayos no destructivos en equipos térmicos.
2. Aplicación del ensayo no destructivo mediante ultrasonido a un generador de vapor.

CAPITULO 1: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos o pruebas no destructivas son un campo de la ingeniería que se va desarrollando rápidamente ya sea en las industrias, como también en las entidades académicas como lo son las universidades, centros de formación técnica, etc. Las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, las que eran relativamente desconocidas hace un par de años, hoy en día se han convertido en herramientas que cotidianamente están utilizando las industrias y dando a conocer a su alumnado los centros de educación anteriormente nombrados, con lo que se desea estar a la vanguardia del mercado dando a sus productos o enseñanza una calidad superior al de su competencia.

Estos procesos o ensayos se realizan bajo el control de procesos estandarizados, los que atienden a normas o códigos de fabricación o aplicación de estos métodos ya sean: ASME, ASTM, API Y AWS, entre otras.

Las actividades que revisten mayor importancia para los fines de este seminario son las pruebas e inspecciones que normalmente se le realizaban o practican a los materiales, y que se pueden dividir de la siguiente forma:

- a) ENSAYOS DESTRUCTIVOS.
- b) ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

El objetivo principal de las pruebas destructivas es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales, como resistencia mecánica, la tenacidad o la dureza. La ejecución de las pruebas destructivas involucra el daño del material, la destrucción de la probeta o la pieza empleada en la determinación correspondiente, por lo que se concluye que los ensayos destructivos son la aplicación de métodos físicos directos que

alteran de forma permanente las propiedades físicas, mecánicas o dimensionales de un material, parte o componente sujeto a inspección.

Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización de los productos o los requisitos de seguridad, como es el caso de la industria aeroespacial, la núcleo eléctrica o la petroquímica, impusieron también nuevas condiciones de inspección, en las cuales se estableció la necesidad de verificar hasta en un 100% los componentes críticos; lo que planteó una severa dificultad a los departamentos de calidad, hasta que iniciaron el empleo de otras técnicas de inspección, diferentes a la visual, con las cuales se medía la integridad de los componentes sin destruirlos. Esto fue posible al medir alguna otra propiedad física del material y que estuviera relacionada con las características críticas del componente sujeto a inspección; es decir, se inició la aplicación de las pruebas no destructivas.

Los ensayos no destructivos, son la aplicación de métodos físicos indirectos, como lo son, la transmisión de sonidos, la negación al paso de la radiación, líquidos indirectos, etc., y que tienen como finalidad verificar y examinar la sanidad de las piezas en estudio. A su vez, cuando se ocupa este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, si no que verifica su homogeneidad y continuidad, lo que lleva a que este tipo de ensayo no reemplace al destructivo si no que ambos se potencian para lograr mejores resultados en el análisis de las piezas o materia a requerir.

El ensayo no destructivo se basa específicamente en realizar pruebas a los materiales sin que se dañen las propiedades físicas, químicas o dimensionales de estos, lo que los hace de una gran ayuda a la mantención de equipos y materiales en las distintas industrias, guiándose o cumpliendo las normas que rigen este tipo de ensayos.

Una serie de normas rige a los ensayos no destructivos, variando las normas según sea donde se aplique el ensayo, ya que, para cada área se aplica un requisito distinto, con exigencias y normativas para cada una de ellas.

Podemos mencionar algunos tipos de clasificación de los ensayos no destructivos y estos se dividen en:

- 1^{er} tipo de clasificación. Según técnica de inspección.
 - a) Técnicas de Inspección Superficial.
 - b) Técnicas de Inspección Volumétrica.
 - c) Técnicas de Inspección de la Integridad o hermeticidad

- 2^{do} tipo de clasificación: Según su tipo de fenómeno físico.
 - a) Ondas electromagnéticas.
 - b) Ondas elásticas o acústicas.
 - c) Emisión de partículas subatómicas.
 - d) Otros fenómenos, como por ejemplo la capilaridad, absorción, etc.

- 3^{er} tipo, según sus aplicaciones: esto permite analizar defectos, medidas y caracterizaciones del material.

Defectología: permite el descubrimiento y control de discontinuidades y deterioro ambiental en las piezas evaluadas.

Caracterización: Evalúa las características físicas, químicas, tecnológicas y mecánicas de los materiales, como también sus propiedades físicas, además de la transferencia de calor.

Metrología: especifica el control de medidas de las piezas, ya sea el de espesores, espesores por un lado, de espesores de recubrimientos, niveles de llenados.

- 4^{to} tipo, según el estado actual de desarrollo:
 - a) Métodos convencionales de END.
 - b) Métodos nuevos o no convencionales de END.

1.1. Tipos de ensayos no destructivos:

- Inspección visual
- Tintas o líquidos penetrantes
- Partículas magnéticas
- Ultrasonido
- Radiografía industrial
- Corriente inducida e inspección visual.

1.1.1. Inspección Visual

Este tipo de ensayo no destructivo fue el primero en utilizarse ya que es más fácil y económico. Consiste en la inspección bajo el ojo humano (ver figura 1.1), y complementado con algunos elementos básicos como una alta iluminación, algún elemento de magnificación y de medición. Es de gran importancia, ya que se puede aplicar durante o al final de cada uno de los ensayos que describiremos a continuación. Se utiliza en todo tipo de materiales.



Figura 1.1 Inspección visual de un cordón de soldadura

Ventajas

- Todo tipo de material puede ser inspeccionado
- bajo costo
- Se ocupan equipos relativamente simples
- La capacitación es simple

Desventajas

- Se evalúa solo condiciones superficiales
- Se requiere de una iluminación alta
- Es necesario tener un acceso despejado en el área donde se ara la inspección

1.1.2. Líquidos y Partículas Penetrantes (LP)

El ensayo de líquido penetrante (ver figura 1.2) es uno de los métodos de END más usado en la detección de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos (metálicos o no metálicos). Este método está fundamentado en la capacidad de penetración de un líquido en discontinuidades, por efectos de capilaridad. Después de un determinado “tiempo de penetración”, se remueve el exceso de penetrante y se aplica un revelador. El revelador absorbe el líquido que ha penetrado en la discontinuidad originando una indicación en la superficie de la pieza.

Actualmente existen 18 posibles variantes de inspección empleando este método; cada una de ellas ha sido desarrollada para una aplicación y sensibilidad específica. Así por ejemplo, si se requiere detectar discontinuidades con un tamaño de aproximadamente medio milímetro, debe emplearse un penetrante fluorescente, removible por post-emulsificación y un revelador seco. Por otra parte, si lo que se necesita es detectar discontinuidades mayores a 2.5 mm, conviene emplear un penetrante contrastante, lavable con agua, y un revelador en suspensión acuosa.

El ensayo de LP es usado para detectar todo tipo discontinuidades superficiales, fisuras, defectos de laminación y forjado, porosidad, como la inspección de piezas críticas, como lo son los componentes aeronáuticos, hasta cerámicos de uso doméstico.

Estas aplicaciones descritas son en metales, pero, esto no hace que sea una limitante a este ensayo, ya que, también se puede en cerámicos vidriado, plástico, recubrimientos electroquímicos.

Normas/Especificaciones:

- ASME V, Art. 6
- ASME I, Calderas
- ASME VIII, Recipientes de presión



Figura 1.2 END por método de LP

Ventajas de este tipo de ensayo no destructivo

- Es muy sensible a las discontinuidades abiertas a las superficies.
- Fácil de emplear.
- Buena sensibilidad.
- Económico y rápido en lo que se refiere a su aplicación y con un equipo de fácil traslado.

Desventajas de este método

- Son aplicables solo a defectos superficiales y materiales no porosos.
- Tener una buena limpieza al momento de la inspección.
- Los inspectores deben tener una alta experiencia en el trabajo.
- Es difícil de retirar de roscas, ranuras o huecos y superficies ásperas.

1.1.3. Partículas Magnéticas

Esta técnica de END (ver figura 1.3) permite detectar defectos superficiales y sub superficiales en materiales ferromagnéticos como el hierro o el acero.

Estas partículas, aplicadas a la pieza durante la magnetización, son atraídas por los campos magnéticos de la fuga creados por las discontinuidades. Las partículas se agrupan para formar una indicación directamente sobre la discontinuidad.

Materiales no ferrosos como aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, plomo, titanio y aceros inox austeníticos no pueden ser inspeccionados por esta técnica

Normas/Especificaciones:

- ASME V, Art. 7
- ASME I, Boilers
- ASME VIII, Pressure Vessel
- ASME B31.3, Petrochemical Piping
- AWS D1.1, Structural welding code steel
- API 1104, Welding of pipeline
- ASME B31.1, Power Piping



Figura 1.3 END con partículas magnéticas

Ventajas de este método

- Requiere un menor grado de limpieza
- Método más rápido y económico
- Revela discontinuidades que no se encuentran en la superficie

Desventajas

- Se aplica solo en materiales ferro-magnéticos
- No hay una gran capacidad de penetración
- El equipo es de un alto valor
- Detecta discontinuidades perpendiculares al campo

1.1.4 Ultrasonido

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

Las ondas sonoras son fenómenos vibratorios que se transmiten a través de un medio elástico, pero no en el vacío.

Por medio de las interfaces se refleja el sonido, el cual se propaga por el material detectando y analizando la presencia y localización de las discontinuidades. El mismo elemento utilizado para generar y recibir las ondas es el palpador. Existen distintos tipos de palpadores con diferentes diámetros y frecuencias. Para que este elemento cumpla la función de emisor y receptor, tiene un cristal piezoeléctrico, que tiene la propiedad de deformarse cuando recibe una presión mecánica, produciendo un voltaje eléctrico

Este método es obtenido bajo el principio físico **pulso-eco**, el cual se basa en la generación de pulsos de alta frecuencia aplicados a un transductor, transformándolos en vibración mecánica.

El área metal mecánica utiliza ampliamente este método, primordialmente en detección de discontinuidades y medición de espesores (ver figura 1.4)



Figura 1.4 Inspección por método de ultrasonido

Ventajas de este método:

- Solo se necesita acceso a un lado del material
- Los resultados son conocidos al instante
- Se adquiere una gran capacidad de penetración
- Es posible determinar detalladamente la localización de la discontinuidad, su orientación y el tamaño
- Es posible detectar las discontinuidades de manera superficial y sub superficial

Desventajas de este método:

- Se torna dificultoso inspeccionar las dimensiones de bajo espesor o de tamaño reducido
- El personal requiere de mayor entrenamiento que en los demás métodos
- Las discontinuidades perpendiculares al haz de sonido son localizadas con mayor facilidad

- Es limitado por el espesor, la estructura interna, la geometría y el acabado superficial del material a examinar
- Es un método costoso

1.1.5. Radiografía Industrial

El ensayo radiográfico se usa principalmente para encontrar defectos internos en materiales, a partir de la exposición del material a radiación penetrante X o Gamma. Los defectos son detectados por diferencias en la absorción de radiación del material, generando zonas oscuras/claras en la placa radiográfica. Defectos internos o externos, como cambios de espesores, fallas, corrosión, inclusiones y fisuras, quedan grabados en la placa radiográfica.

Normas/Especificaciones:

- ASME V, Art. 2
- ASME I, Boiler
- ASME VIII, Pressure Vessel
- ASME B31.1, Power Piping
- ASME B31.3, Petrochemical Piping
- AWS D1.1, Structural welding code steel
- API 1104, Welding of pipeline

Equipos que se pueden ocupar:

- 1 Fuente Gamma - Gammamat (50 Ci)
- 2 Fuentes Gamma- Montoto (100 Ci)
- 3 Equipos completos de radiografía de campo.

Ventajas.

- El uso se extiende a distintos tipos de materiales.
- Se obtiene una imagen del interior del material.
- Hay un registro permanente de la inspección.
- Descubre errores de fabricación, pudiendo realizar correcciones.

Desventajas.

- No se recomienda en piezas de compleja geometría.
- La inspección de la pieza debe tener acceso al menos por dos lados.
- Su empleo requiere estrictas medidas de seguridad.
- Las discontinuidades de tipo laminar no son detectadas por este método.



Figura 1.5 Radiografía industrial

1.1.6. Método de Corriente Inducida

Este método es una prueba netamente superficial, funciona o se maneja bajo el principio de la corriente inducida, donde un campo magnético alternante induce corriente sobre la pieza la cual se desea inspeccionar si esta es de un material conductor.

El patrón de corrientes inducidas y el campo magnético que necesariamente está asociado a ellas, están influenciados por diferentes características del material bajo prueba, las que son tres:

- Detección de discontinuidades
- Propiedades de materiales
- Mediciones dimensionales

Aplicaciones:

- Tuberías de calderas
- Fuselaje de aviones
- Trenes de aterrizaje
- Turborreactores
- Cascos de barcos
- Intercambiadores de calor

Ventajas

- Detecta heterogeneidades superficiales o muy cercanas a ella
- Evaluación instantánea
- No ocupa el contacto para realizar el ensayo

Desventajas

- Se aplica solo a materiales que conducen la electricidad
- Se requiere mucho tiempo para inspección de áreas grandes
- Personal altamente calificado y con experiencia

Los ensayos anteriormente mencionados muestran los diversos métodos de inspección, a diferentes tipos de piezas y de materiales distintos, sin tener que destruir la pieza, para saber más de sus propiedades, discontinuidades, espesores, etc.

CAPITULO 2: ULTRASONIDO

Los ultrasonidos son vibraciones mecánicas que se transmiten en medios elásticos, a través de ondas de idéntica naturaleza que el sonido, pero a frecuencias mayores a los 20 [kHz], es decir fuera del rango audible para el ser humano. [Muzzioli, 1961].

Rango de frecuencias sonoras:

- Infrasonica, $f < 16$ Hz
- Sónicas, $20 < f < 20$ kHz
- Ultrasónica, $f > 20$ kHz

En el uso industrial, las aplicaciones del ultrasonido alcanzan un rango de frecuencia que va desde los 0.5 a 25 [MHz]. No obstante, dependiendo de la posibilidad de generación y recepción de ondas de altas frecuencias, se pueden alcanzar frecuencias mayores

El principio Físico en el cual se basa el ultrasonido como método de ensayo no destructivo, es la transmisión a velocidades constantes de señales sonoras ultrasónicas a través del material, esto quiere decir que ocurre un cambio en la impedancia acústica.



Figura 2.1 Inspeccion por ultrasonido con equipo **EPOCH 1000i**

2.1. PRINCIPIOS ACUSTICOS BASICOS

Con el fin de lograr un óptimo entendimiento del ultrasonido, es que se hace necesario el conocimiento de algunos de los factores físicos de la acústica

2.1.1 El Sonido:

El sonido se define como la vibración mecánica de un conjunto de partículas en un medio, las partículas vibran alrededor de un punto fijo, esto ocurre a la misma frecuencia que la onda sonora generada. Las partículas reaccionan ante la energía disipada por la onda, pero no se trasladan con esta, esto implica que la energía de la onda es la que se transmite a través del material, por medio de sus partículas.

El medio transmisor es fundamental, esto debido a que el sonido no se propaga en el vacío. Por ello, para que se genere el sonido, es necesaria una fuente de vibración mecánica y también un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso) a través del cual se propague la perturbación. El aire es el medio transmisor más común del sonido. La velocidad de propagación del sonido en el aire es de aproximadamente 343 m/seg. a una temperatura de 20 °C (293 kelvin).

2.1.2 Sonido Continuo:

Es aquel generado cuando el tiempo de duración del sonido es mayor al tiempo de oscilación de la onda.

2.1.3 Sonido de impulso:

Este tipo de sonido se caracteriza porque el tiempo de oscilación es prácticamente igual al tiempo de duración, existiendo una pausa entre cada impulso. El sonido por impulsos es el utilizado al aplicar la técnica del ultrasonido

2.2 Parámetros del sonido:

El sonido está caracterizado por tres cualidades:

- Intensidad.
- Tono.
- Timbre.

2.2.1 Intensidad:

Cuanto mayor sea la energía de vibración de las partículas, el sonido será más intenso. La intensidad de una onda sonora depende directamente de la amplitud de la misma.

2.2.2. Tono:

Es la característica del sonido que nos permite distinguir entre un sonido agudo o grave. Depende de la mayor o menor frecuencia de la onda. A mayor frecuencia, sonidos más agudos, y a menor frecuencia se producen sonidos más graves.

2.2.3. Timbre:

Es un parámetro del sonido, que nos permite distinguir un mismo tono, pero producido por dos instrumentos diferentes. Esto indica que el timbre de un sonido depende del medio que lo genere.

2.3 Onda sonora.

Para que existan las ondas sonoras debe haber una perturbación o vibración en algún medio. Las ondas sonoras en gases y líquidos son principalmente ondas longitudinales. Sin embargo, las perturbaciones sónicas que se mueven a través de sólidos pueden tener componentes tanto longitudinales como transversales.

Cuando nos referimos a una onda sonora, hablamos de vibración, un movimiento atrás y adelante; alternativo, de una forma ordenada. Cuando una partícula parte de un punto "O" y se desplaza hasta una posición máxima "+"; luego, se devuelve al punto "O", pero continúa su movimiento hacia atrás y logra otra posición de desplazamiento máximo "-"; y regresa al punto "O", ha realizado un ciclo (Figura 2.1). El concepto de ciclo está relacionado directamente con el período y la frecuencia.

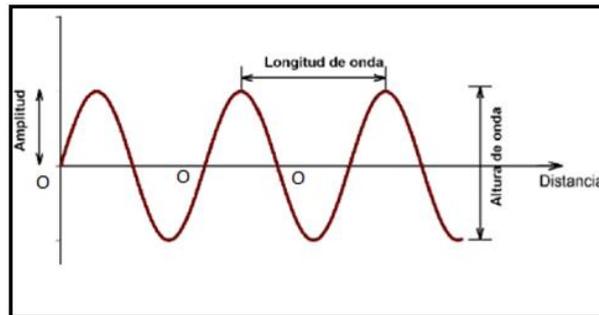


Figura 2.1 Onda sonora

Características fundamentales de una onda:

- Periodo
- Frecuencia
- Amplitud
- Longitud de onda

2.3.1 Periodo:

Tiempo que tarda la partícula vibrante en realizar un ciclo completo. Se nota por la letra T y es una magnitud inversa a la frecuencia.

$$T = \frac{1}{f}$$

2.3.2 Frecuencia:

La frecuencia es, precisamente, lo que define a los ultrasonidos y los distingue de los sonidos, y corresponde al número de oscilaciones que se producen en una unidad de tiempo. Se nota por la letra f y es una magnitud inversa al periodo.

$$f = \frac{1}{T}$$

2.3.3 Amplitud:

Es el máximo desplazamiento realizado por la partícula en el eje de la ordenada, producto de la vibración, partiendo desde su posición "O".

2.3.4 Longitud de onda:

Corresponde a 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 periodo y la longitud de onda están relacionados, ya que el periodo es el tiempo que demora una partícula en recorrer una longitud de onda. Para todos los tipos de ondas se cumple la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

2.4. Atenuación o amortiguación de onda

Es la pérdida continua de la amplitud de una oscilación debido a la transformación de la energía de oscilación en calor, cuando pasa a través de un elemento, a causa de la fricción la intensidad de la energía aplicada disminuye, siendo amortiguada en tasas diferentes según el tipo de material.

2.5. Dispersión

Según el material por el que se propaga una onda acústica, esta sufre mayor o menor rebote. Los cambios varían dependiendo de la concentración, estructura, orientación de las fibras, porosidad, tamaño de la partícula, y alguna otra variación en la estructura atómica que afectan la amplitud, la dirección, y la frecuencia de las señales de onda.

2.6 Velocidad de propagación

La velocidad a la que el ultrasonido se transmite por un medio determinado depende de la densidad y de la elasticidad de dicho medio. En general la velocidad de propagación del sonido es la distancia recorrida por las ondas a través de un medio en una unidad de tiempo.

La velocidad del sonido es por lo general un parámetro ultrasónico fácil de medir, en un medio homogéneo está directamente relacionado con el módulo de elasticidad, densidad del material, módulo de Poisson, y el grado de homogeneidad. Según el tipo de onda la velocidad también es diferente. La velocidad se relaciona con la longitud y frecuencia de onda como sigue:

$$V = \lambda \times f \quad \text{O,} \quad V = \frac{\lambda}{T}$$

Ecuación de velocidad de propagación en un medio sólido:

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Las velocidades de las ondas longitudinales y transversales también están influenciadas por las propiedades de los materiales, así por ejemplo en el acero SAE 1020 la velocidad de la onda longitudinal es $5,89 \times 10^5$ cm/s y la transversal $3,24 \times 10^5$ cm/s.

2.7 Presión acústica.

En los puntos de gran densidad de partículas, la presión es también mayor que la presión normal, mientras que en las zonas dilatadas es menor. Un medidor microscópico de presión, colocado en el campo de la onda elástica, indicaría alternativamente presiones altas y bajas, según una secuencia periódica. Esta presión alterna es la presión acústica. Ocurre no sólo en los gases, sino también en los líquidos y en los sólidos. La desviación máxima en relación con la presión normal (sin la presencia de onda acústica alguna), se denomina "amplitud de la presión acústica", y está íntimamente relacionada con la amplitud de oscilación.

CAPITULO 3. PROPAGACIÓN DE ONDAS EN MEDIOS ELASTICOS

3.1. Propagación de ondas en medios infinitos

Cunado estudiamos la propagación de ondas en medios tridimensionales, se utilizan las ecuaciones de elastodinámica, consideremos una clase de problemas en los que la interacción con los contornos no es posible, esta clase de problemas es denominada; propagación de ondas en medios infinitos.

3.2. Ecuación:

Las ecuaciones para un medio (sólido) elástico isotrópico y homogéneo, sometido a pequeñas deformaciones, en coordenadas cartesianas es:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (3.1)$$

Esta ecuación es análoga de la 2da ley de newton aplicado a un medio continuo.

$$\sigma_{ij,j} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (3.2)$$

La relación (3.2) representa una relación constitutiva que caracteriza el régimen elástico de un material isotrópico donde λ e μ son llamadas contantes de Lamé y caracterizan mecánicamente el medio.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.3)$$

Definición del tensor de pequeñas deformaciones.

Las ecuaciones que rigen en termino del desplazamiento son obtenidas sustituyendo (3.3) en (3.2), y la expresión resultante en (3.1). Estas ecuaciones que rigen o gobiernan en términos de desplazamiento son llamadas ecuaciones de

Navier para un medio, y se muestran a continuación:

$$(\lambda + \mu)u_{j,ij} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i, \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

$$\text{Entonces, } u = u(x, t) = u(x_1, x_2, x_3, t) = u(x, y, z, t) \quad (2.4)$$

Suponer:

u_1 = dirección en x_1 , u

u_2 = dirección en x_2 , v

u_3 = dirección en x_3 , w

En notación escalar cartesiana, esto representa tres ecuaciones:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + \mu \nabla^2 u_1 + \rho f_x &= \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}, \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + \mu \nabla^2 u_2 + \rho f_y &= \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}, \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + \mu \nabla^2 u_3 + \rho f_z &= \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \quad (3.6)$$

La ecuación en notación vectorial correspondiente a:

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \bar{u} + \mu\nabla^2\bar{u} + \rho f = \rho \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

Las ecuaciones (3.4) y (3.7) corresponden a ecuaciones vectoriales compuestas por tres ecuaciones escalares. Estas ecuaciones escalares en coordenadas rectangulares son:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right] \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho [f_x, f_y, f_z] = \rho [\ddot{u}, \ddot{v}, \ddot{w}] \end{aligned} \quad (3.8)$$

La ecuación (3.8) se puede descomponer en tres ecuaciones constitutivas e independientes:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right] + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial w^2} \right] + \rho f_x &= \rho \ddot{u} \\ (\lambda + \mu) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right] + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial w^2} \right] + \rho f_y &= \rho \ddot{v} \\ (\lambda + \mu) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right] + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial w^2} \right] + \rho f_z &= \rho \ddot{w} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Donde u es el desplazamiento en la dirección x , v es el desplazamiento en la dirección y y w es el desplazamiento en la dirección z , ρ es la densidad, y $f_{x,y,z}$ es la fuerza por unidad de masa en la dirección que indica el subíndice.

Notar el grado de complejidad de las ecuaciones del movimiento expuesto en la ecuación (3.8), que se constituye de 3 ecuaciones diferenciales parciales acopladas. Es posible obtener un sistema de ecuaciones más simple introduciendo lo que llamamos: una función potencial escalar Φ y una función potencial vectorial Ψ , tal que:

$$u = \nabla\Phi + \nabla \times \psi \quad (2.10)$$

Donde;

$$\nabla\psi = 0 \quad (2.11)$$

Tomando en cuenta que;

$$\psi = [\psi_x, \psi_y, \psi_z]$$

Descomponemos la ecuación (3.10): descomposición de Helmholtz. Sustituyendo así las ecuaciones (3.10) y (3.11) en la ecuación (3.7), y considerando que, se tiene:

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla(\nabla\Phi + \nabla \times \psi) + \mu\nabla^2(\nabla\Phi + \nabla \times \psi) = \rho(\nabla\ddot{\Phi} + \nabla \times \ddot{\psi}) \quad (2.12)$$

Reagrupando;

$$\nabla[(\lambda + 2\mu)\nabla^2\Phi - \rho\ddot{\Phi}] + \nabla \times [\mu\nabla^2\psi - \rho\ddot{\psi}] = 0 \quad (2.13)$$

La ecuación se satisface si cada término entre corchetes es igual a cero.

Luego:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2\Phi - \rho\ddot{\Phi} = 0 \quad (2.14)$$

$$\mu\nabla^2\psi - \rho\ddot{\psi} = 0 \quad (2.15)$$

Donde (3.14) es una ecuación escalar y (3.15) ecuación vectorial.

Las ecuaciones (3.14) y (3.15) pueden ser escritas de la siguiente forma:

$$\nabla^2\phi - \frac{1}{c_L^2}\ddot{\phi} = 0 \quad (2.16)$$

$$\nabla^2\vec{\psi} - \frac{1}{c_T^2}\ddot{\vec{\psi}} = 0 \quad (2.17)$$

Donde;

$$c_L^2 = \frac{\lambda + 2 * \mu}{\rho}$$

y

$$c_T^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.18)$$

Como resultado, la ecuación de movimiento (2.7) es descompuesta en dos ecuaciones de onda simplificada, (2.16) y (2.17).

CAPITULO 4. REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

4.1 Introducción

Las consideraciones de la reflexión y refracción de ondas son fundamentales para el estudio de la propagación de ondas en sólidos. Este capítulo se presenta conceptos básicos con énfasis en los fenómenos físicos, al mismo tiempo que se examinará el comportamiento del haz de incidencia normal de la reflexión y, el análisis de la incidencia oblicua

4.2. Comportamiento normal de los factores que inciden en la reflexión

Cuando una onda plana se encuentra con un interfaz entre dos materiales se divide en dos componentes: parte de la energía del interfaz se transmite y la otra se refleja.

Esta ecuación puede ser derivada igualando la tensión normal en el interfaz con el desplazamiento de la partícula velocidad. Considerando una onda incidente plana armónica σ_1 , viajando en una dirección x a un interfaz entre dos medios, como se muestra en la figura (4.1). La tensión se refleja σ_R , y se transmite σ_T . Puesto que el campo elástico es independiente de la dirección y , todas las derivadas con respecto a y desaparecerán de las ecuaciones de movimiento. La ecuación de onda simple es aplicable ya sea para ondas longitudinales o transversales como se demuestra a continuación

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (4.2)$$

Donde u_x y u_y , son componentes del vector desplazamiento a lo largo del eje x e y respectivamente.

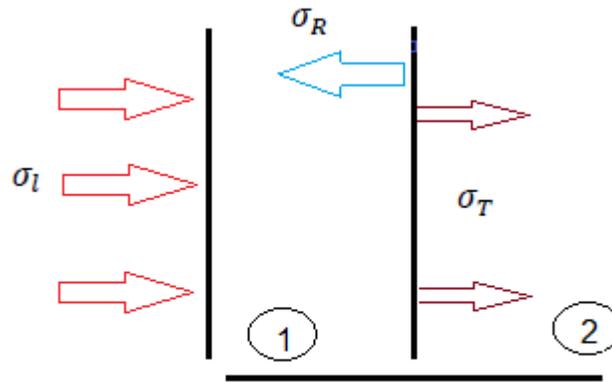


Figura (4.1). Factor de reflexión

A continuación se observa la onda de compresión. La solución para una onda armónica de compresión en la ecuación (4.1) es:

$$u_x = A_1 e^{i(kx - \omega t)} + A_2 e^{-i(kx + \omega t)} \quad (4.3)$$

Donde;

$$k = \frac{\omega}{c_L}, c_T^2 = \frac{\mu}{\rho} \text{ y } c_L^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \quad (4.4)$$

En la ecuación (4.3), el primer término explica la propagación de una onda en la dirección positiva x y el segundo término describe la propagación en la dirección negativa.

Tomando la forma de onda incidente como:

$$u_x^I = I e^{i(k_1 x - \omega t)}, \quad k_1 = \frac{\omega}{c_L^{(1)}} \quad (4.5)$$

En este caso, el campo reflejado queda como:

$$u_x^{(R)} = A_R e^{-i(k_1 x + \omega t)} \quad (4.6)$$

El campo transmitido en el segundo medio es:

$$u_x^{(T)} = A_T e^{i(k_2 x - \omega t)}, \quad k_2 = \frac{\omega}{c_L^{(2)}} \quad (4.7)$$

Donde A_R y A_T son desconocidos.

Hay que satisfacer las condiciones de contorno en la interfaz. Todo el campo elástico en medio 1 es:

$$u^1 = u_x^{(I)} + u_x^{(R)} = I e^{i(k_1 x - \omega t)} + A_R e^{-i(k_1 x + \omega t)} \quad (4.8)$$

En el medio 2:

$$u^2 = u_x^{(T)} = A_T e^{i(k_2 x - \omega t)} \quad (4.9)$$

Las condiciones de contorno son las siguientes:

$$u^{(1)}|_{x=0} = u^{(2)}|_{x=0} \quad (4.10)$$

$$\sigma_x^{(1)}|_{x=0} = \sigma_x^{(2)}|_{x=0} \quad (4.11)$$

$$\sigma_{xy}^{(1)}|_{x=0} = \sigma_{xy}^{(2)}|_{x=0} \quad (4.12)$$

Para el caso unidimensional, la ley de Hooke generalizada es:

$$\sigma_x = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (4.13)$$

$$\sigma_{xy} = 0 \quad (4.14)$$

Sustituyendo (4.8) y (4.9) en (4.10), se obtiene:

$$I + A_R = A_T \quad (4.15)$$

De (4.8), (4.9) y (4.13) resulta:

$$\sigma_x^{(1)} = i(\lambda_1 + 2\mu_1) \cdot k_1 [I e^{i(k_1 x - \omega t)} - A_R e^{-i(k_1 x - \omega t)}] \quad (4.16)$$

$$\sigma_x^{(2)} = i(\lambda_2 + 2\mu_2) \cdot k_2 \cdot A_T e^{i(k_2 x - \omega t)} \quad (4.17)$$

Sustituyendo (4.16) y (4.17) en (4.11) se obtiene:

$$(\lambda_1 + 2\mu_1) \cdot k_1 [I - A_R] = (\lambda_2 + 2\mu_2) k_2 A_T \quad (4.18)$$

Donde el número de onda es:

$$k_n = \frac{\omega}{c_L^{(n)}} \quad (n = 1, 2) \quad (4.19)$$

$$\lambda_n + 2\mu_n = \rho_n \cdot [c_L^{(n)}]^2 \quad (4.20)$$

Donde n es el número de medios, utilizando (4.19) y (4.20), las ecuaciones (4.15) y (4.18) nos lleva al siguiente sistema:

$$I + A_R = A_T$$

$$\rho_1 c_L^{(1)} (I - A_R) = \rho_2 c_L^{(2)} \cdot A_T \quad (4.21)$$

Solucionando el sistema:

$$A_R = \frac{\rho_1 c_L^{(1)} - \rho_2 c_L^{(2)}}{\rho_1 c_L^{(1)} + \rho_2 c_L^{(2)}} \cdot I \quad (4.22)$$

$$A_T = \frac{2\rho_1 c_L^{(1)}}{\rho_1 c_L^{(1)} + \rho_2 c_L^{(2)}} \cdot I \quad (4.23)$$

Los campos de ondas reflejadas y transmitidas se pueden obtener de (4.6) y (4.7) mediante el uso de la expresión (4.22) y (4.23).

Ahora podemos considerar incidente, reflejada y esfuerzos transmitidos, de (4.13) concluyendo que:

$$\sigma_x^{(1)} = (\lambda_1 + 2\mu_1) \frac{\partial u_x^{(1)}}{\partial x} = ik_1(\lambda_1 + 2\mu_1)e^{i(k_1x - \omega t)} \quad (4.24)$$

Del mismo modo el campo de tensión reflejada se obtiene como:

$$\sigma_x^{(R)} = -ik_1(\lambda_1 + 2\mu_1)e^{-(k_1x - \omega t)} \quad (4.25)$$

El campo de la onda transmitida se presenta en la ecuación (4.17). El coeficiente de esfuerzo de reflexión y transmisión se pueden obtener de (4.17), (4.24) y (4.25) de modo que:

$$R = \frac{\sigma_x^{(R)}}{\sigma_x^{(I)}} \Big|_{x=0} = -\frac{A_R}{I} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (4.26)$$

$$T = \frac{\sigma_x^{(T)}}{\sigma_x^{(I)}} \Big|_{x=0} = \frac{(\lambda_2 + 2\mu_2)k_2}{(\lambda_1 + 2\mu_1)k_1} \cdot \frac{A_T}{I} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (4.27)$$

Se puede definir la impedancia acústica como $W = \rho c_L$; el coeficiente de reflexión se puede escribir como:

$$R = \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} \quad (4.28)$$

El coeficiente de transmisión es:

$$T = \frac{2W_2}{W_1 + W_2} \quad (4.29)$$

La fórmula para la partición de la energía en la interfaz en los modos de transmisión y reflexión puede derivarse considerando la energía como proporcional al cuadrado de la magnitud de presión. El flujo de energía por unidad de tiempo a través de una unidad de área normal a la dirección de propagación se define como la intensidad de la onda ($I_I, I_R, o I_T$). La intensidad se evalúa más de un ciclo y depende de la amplitud de la siguiente manera:

$$I_R = \frac{A_R^2}{2\rho_1 c_L^{(1)}} , \quad I_T = \frac{A_T^2}{2\rho_1 c_L^{(2)}} , \quad I_I = \frac{1}{2\rho_1 c_1^{(L)}} \quad (5.30)$$

Las ecuaciones (4.26), (4.27) y (4.30) arrojan:

$$\frac{I_R}{I_I} = \left(\frac{B - 1}{B + 1} \right)^2 \quad \text{y} \quad \frac{I_T}{I_I} = \frac{4B}{(B + 1)^2}$$

Donde $B = \frac{W_2}{W_1}$

La expresión para la impedancia acústica W , puede ser considerada como una propiedad característica de los materiales.

$$W = \rho c \sim \sqrt{\rho E}$$

La inclusión de la impedancia acústica en esta ecuación nos da una indicación de la rigidez de los materiales. La rigidez está relacionada al módulo de Young (E), del material; en general, mientras mayor sea la rigidez del material, mayor será la velocidad de la onda.

4.3. Ley de Snell

Sucedan varias cosas cuando una onda ultrasónica con un ángulo determinado de inclinación se encuentra con una interfaz entre dos materiales. En primer lugar, la refracción se produce en la misma forma como se produce en las ondas de luz ópticas. Considérese el diagrama en la Figura 5.1. El ángulo de refracción se puede calcular a partir de la ley de Snell.

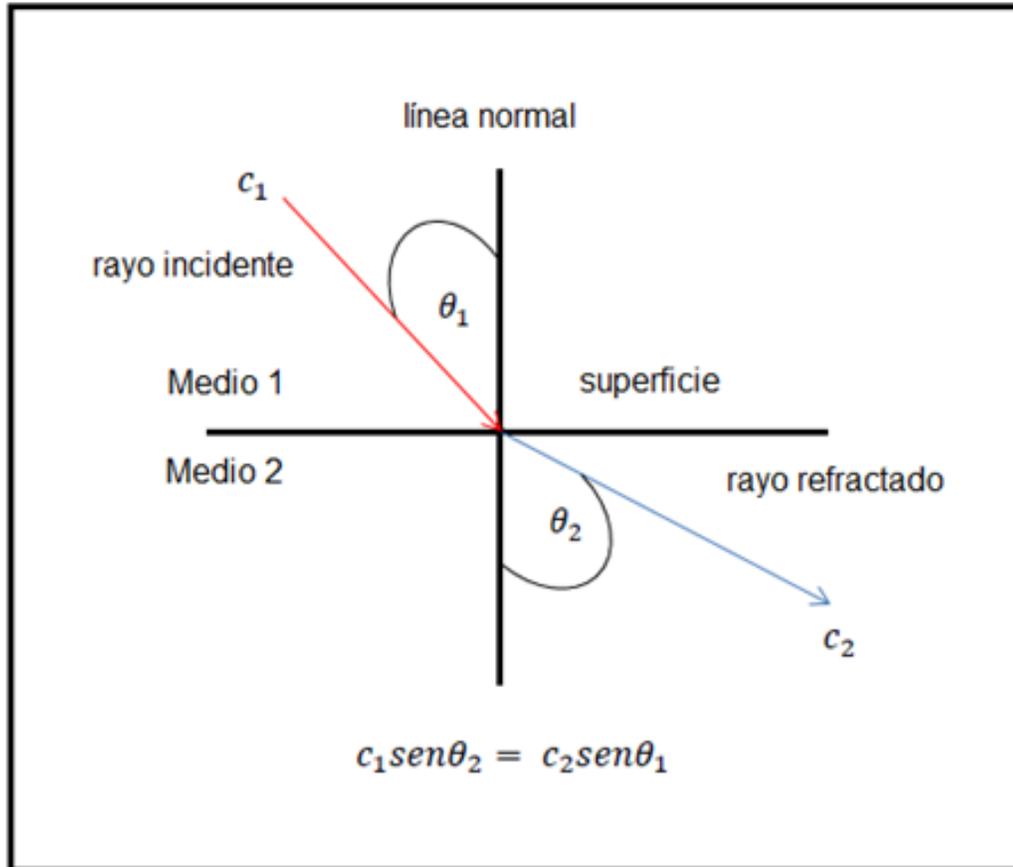


Figura 5.1 Ley de Snell para análisis de ángulos

En segundo lugar lo que se produce en la interfaz es el modo de conversión. La energía se distribuye en las ondas longitudinales y de corte en el segundo material. Parte de la energía es reflejada, en donde el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Si consideramos una fuerza que actúa en la interfaz en un determinado ángulo θ . Esta fuerza independientemente genera un movimiento de onda muy complicado en la estructura. El movimiento de las ondas complicado puede ser considerada como una superposición de dos movimientos específicos: uno asociado con una fuerza normal y la propagación de ondas normal, el segundo asociado con una fuerza de corte y la propagación de la onda de corte. Si tenemos en cuenta que el tipo pulso de excitación a distancias alejadas de la

fuerza de carga provoca la separación de dos formas de onda, ya que la velocidad de la onda de corte es menor que la velocidad de la onda normal. Con la excitación de onda continua, sin embargo, los dos movimientos de las ondas se superponen y es bastante complejo a lo largo de toda la estructura. Un completo análisis del problema de la conversión de modo que considera dos ondas en cada lado de la interfaz. En este caso, tanto las ondas normal y cortante se produce en ambos materiales, y el proceso de superposición podría generar una onda interfaz que podría viajar a lo largo de la interface de los dos materiales.

La ley de Snell y los aspectos cualitativos de conversión de modo se puede entender mediante la revisión de los aspectos de la derivación matemática de la ley de Snell. Considere una porción finita de un frente de onda inclinada en el plano del papel como segmento AB, viajando hacia la interfaz entre los materiales 1 y 2 como se ilustra en la Figura 5.2. Utilizando el principio de Huygens de propagación de la onda esférica, imaginar una onda esférica generada desde el punto A y un generador posterior de ondas esféricas se mueven en una dirección de A a C como la onda del segmento AB se mueve hacia la interfaz entre los cuerpos 1 y 2. La construcción de la AB de frente de onda inicial y la onda de CD en el material 2 en algún momento posterior (establecido cuando el punto B se desplaza a C sólo en la interfaz) nos permite obtener la ley de Snell por trigonometría. Puesto que el tiempo recorrido de B a C en el material 1 debe ser el mismo que el tiempo que tarda una onda de pasar de A a D en el material 2, podemos configurar fácilmente estos tiempos iguales a la ley de Snell derivando.

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}} \quad \text{y} \quad \text{sen}\theta_2 = \frac{\overline{AD}}{\overline{AC}}$$

Dónde:

$$\overline{AC} = \overline{AC}$$

Por lo tanto:

$$c_1 \text{sen} \theta_2 = c_2 \text{sen} \theta_1$$

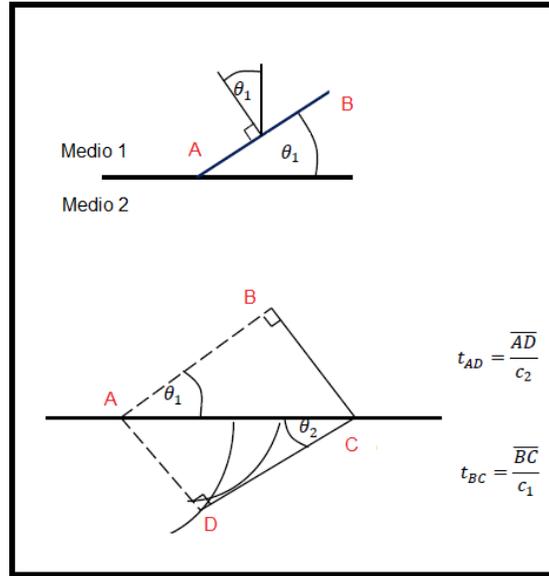


Figura 5.2 Derivación de Ley de Snell

La ley de Snell, derivado en el análisis de onda de velocidad, también se puede utilizar para calcular los ángulos de refracción de corte en el material 2. Las dos ecuaciones se ilustran en la figura 5.3.

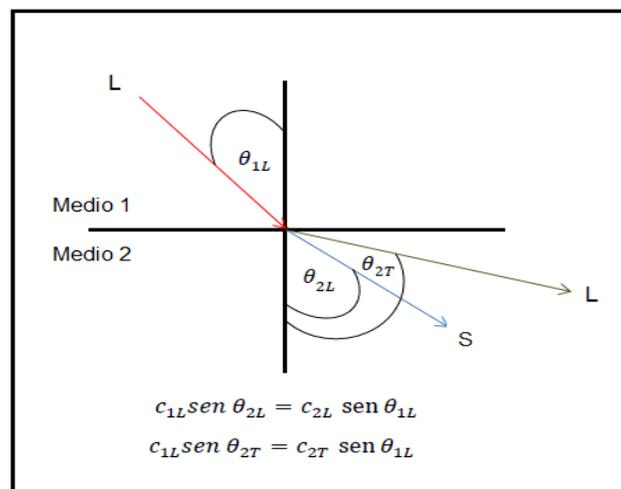


Figura 5.3 Modo conversión Ley de Snell

CAPITULO 5: ULTRASONIDO EN MEDICIÓN DE ESPESORES EN EQUIPOS TÉRMICOS

Como ya se ha mencionado en el presente seminario, los ensayos no destructivos son un método de análisis de materiales donde se aplican métodos físicos indirectos, con el objetivo de verificar y examinar la sanidad de las piezas.

Para poder realizar estos ensayos en las distintas empresas cada país se tiene que regir por ciertos parámetros y controles de calidad dependiendo del área en que se desenvuelva esta entidad, lo que a su vez implica seguir el proceso que estos controles exigen a las industrias para poder llevar a cabo los distintos tipos de ensayos no destructivos.

La repetitividad y confiabilidad de los ensayos no destructivos dependen en gran medida de los conocimientos y habilidades de los individuos que los realizan. Por este motivo se debe prestar atención a la capacitación y experiencia de los inspectores, además de seguir las normas que rigen este tipo de ensayos. En el punto 5.3 del actual capítulo se mostrara cómo se debe llevar el proceso de ensayo de ultrasonido a un equipo térmico, regido por norma, en este caso el código ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

5.1. Principio del Ultrasonido

Tal como se expuso en el punto 1.1.4 del presente seminario, para producir una onda ultrasónica es necesario un transductor piezoeléctrico que transforma las señales eléctricas en sonoras y viceversa. Este transductor es un cristal de cuarzo piezoeléctrico que se encuentra fijo en un alojamiento a prueba de agua, que permite su conexión eléctrica a un generador o transmisor-receptor de pulsos (modo pulso-eco). Cuando se transmite la señal,

el cristal recibe un breve pulso de energía eléctrica de alto voltaje, lo que genera que este se deforme al cambiar precipitadamente su configuración geométrica, emitiendo una onda de alta frecuencia. Al momento de recibir la señal, las ondas ultrasónicas o los ecos que retornen mediante la trayectoria acústica, generan una señal al comprimir el cristal, que es amplificada y procesada por el receptor. Es necesario que los pulsos generados y obtenidos por los transductores estén acústicamente acoplados con el material a inspeccionar, tal como se muestra en la Fig. 5.1

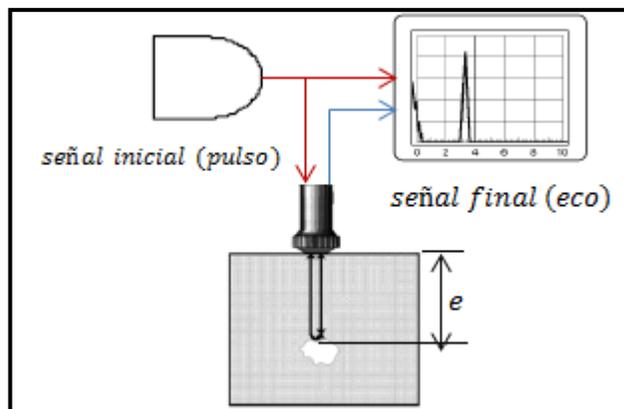


Figura 5.2 Esquema eco-pulso

5.2. Conceptos fundamentales para un ensayo con Ultrasonido

5.2.1. Impedancia acústica

La Impedancia Acústica es la resistencia que opone el medio a la propagación de las ondas, siendo igual al producto de la densidad del material a inspeccionar por la velocidad de la onda en dicho medio. Por lo tanto, un material que posea baja impedancia acústica significa que posee baja resistencia a las deformaciones elásticas producto de las ondas sonoras.

$$Z = \rho V$$

Importancia de la impedancia acústica:

- La determinación de la transmisión y reflexión acústica en la superficie de contacto de dos materiales que poseen distintas propiedades.
- El diseño de los cabezales ultrasónicos.
- Evaluación de la capacidad de absorción de sonido de un medio.

Cuadro de velocidades para diferentes metales

| MATERIAL | DENSIDAD (g/cm ³) | VELOCIDAD LONGITUDINAL (m/s) | VELOCIDAD DE CORTE (m/s) |
|----------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Acero | 7.8 | 5850 | 3230 |
| Aire | 0.001 | 330 | -- |
| Aluminio | 2.7-2.8 | 6250-6350 | 3100 |
| Bronce | 8.86 | 3530 | 2230 |
| Oro | 19.3 | 3240 | 1200 |
| Cuarzo | 2.65 | 5736 | -- |
| Plata | 10.5 | 3600 | 1590 |
| Titanio | 4.54 | 6100 | 3120 |
| Zinc | 7.1 | 4170 | 2410 |

5.2.2. Atenuación

Es la reducción del nivel de una señal, cuando pasa a través de un elemento; la intensidad de la energía aplicada disminuye con el espesor del material, siendo amortiguada en tasas diferentes según el tipo de material, la amortiguación se debe a los efectos interactivos de la densidad, dureza, viscosidad, y estructura molecular. La atenuación en un material dado, normalmente aumenta con la frecuencia y se mide en decibeles, pero también se puede medir en porcentajes. El principal mecanismo de la atenuación de la onda es la absorción, que retiene y convierte en calor a la energía.

5.2.3. Frecuencia (el Espectro)

Todos los materiales tienden a actuar hasta cierto punto como un filtro al paso de la onda, atenuando o dispersando. Las ondas del sonido oscilan a una frecuencia específica, esto es, número de vibraciones o ciclos por segundo. El oído humano percibe hasta una frecuencia máxima de aproximadamente 20 000 ciclos por segundo (20 KHz), mientras la mayoría de aplicaciones ultrasónicas utilizan frecuencias entre 500 000 y 10000 000 ciclos por segundo (500 KHz a 10 MHz). Las frecuencias altas son menos eficientes en el aire y otros gases, en la mayoría de los líquidos y materiales de ingeniería viaja libremente.

5.2.4. Efecto piezoeléctrico

Una parte importante del principio del ensayo no destructivo mediante ultrasonidos es este efecto aprovechado casi universalmente, es básicamente una pieza de material polarizado (en cierta parte las moléculas se encuentran cargadas positivamente mientras que en otra parte las moléculas se encuentran cargadas negativamente) con electrodos adheridos a dos de sus caras opuestas. Cuando un campo eléctrico es aplicado a lo largo del material las moléculas polarizadas se alinearán con el campo resultando un dipolo inducido en la estructura cristalina. Esta alineación de las moléculas causará un cambio dimensional, llamado electrostricción.

5.2.5. Palpador

El palpador (ver figura 5.4) es el que contiene el elemento piezoeléctrico que convierte la señal eléctrica en vibraciones mecánicas (emisión) y las vibraciones mecánicas en energía eléctrica (recepción). Algunos factores como la construcción mecánica y eléctrica, afectan el comportamiento del cabezal. La

construcción mecánica incluye parámetros como la superficie de radiación, el amortiguamiento propio, el encapsulado, el conexionado, entre otros.

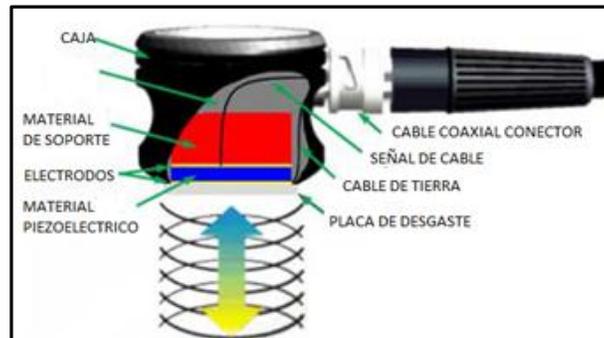


Figura 5.4 Componentes del palpador

Luego de haber profundizado en algunos conceptos importantes del ensayo no destructivo por ultrasonido, se revisará a fondo el artículo V del código ASME, que será el utilizado para realizar el ensayo correspondiente a este seminario.

5.3. Código ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)

Fundada en 1880 como la sociedad de ingenieros industriales, ASME es una organización sin fines de lucro, que promueve el arte, la ciencia y la práctica de la ingeniería mecánica y multidisciplinaria de las ciencias aliadas.

ASME desarrolla los códigos y estándares que mejoran la seguridad pública, y proporciona aprendizaje constante y oportunidades de intercambio técnico que benefician a la comunidad global de la ingeniería y tecnología a nivel mundial.

Actualmente ASME es una sociedad mundial de ingeniería enfocada en aspectos:

- Técnicos
- Educativos
- Investigativo

Posee más de 125.000 miembros y dirige una de las más grandes operaciones de publicaciones técnicas, imparte conferencias técnicas y cursos de desarrollo profesional cada año y fija muchos estándares industriales y de manufactura.

Este conjunto de normas se divide en diferentes secciones, para los diferentes tipos de trabajos, capacitaciones, y certificaciones que hoy en día lleva en las industrias. Este seminario se concentra en la estructura organizativa para calderas, recipientes y partes a presión.

- SECCION I: Calderas a presión
- SECCION VIII: Códigos para recipientes a presión sin fuego
- SECCION V: Ensayos no destructivos
- ARTICULOS: Cuatro y cinco
- ASME B31.1: Tuberías de poder

Siendo la más importante para este seminario la SECCION V con los ARTICULOS 4 Y 5 que darán a conocer la organización o planificación de cómo realizar el ensayo no destructivo mediante ultrasonido, especificando todo lo necesario para poder realizarlo de una manera correcta.

Esta planificación o plantilla da a conocer de buena manera los pasos a seguir para realizar un ensayo de ultrasonido sin dejar escapar detalle alguno para el buen funcionamiento de este.

CAPITULO 6: NORMAS PARA MEDICIÓN DE ESPESORES EN EQUIPOS TÉRMICOS

En cada ensayo no destructivo mediante el ultrasonido es necesario guiarse por lo que la norma ASME dice en su primer artículo para medición de espesores que es el T-510, donde se establecen los requisitos o las frecuencias que se van a utilizar en la selección y el desarrollo del examen de ultrasonido donde se detallan los procedimientos para las partes, componentes, materiales y todas las determinaciones de espesores. Esto deberá ser consultado en concreto para los requisitos siguientes:

- La calificación/ requisitos de certificación del personal
- Los requisitos de procedimientos/ demostración, capacitación y aceptación
- Las características del sistema del examen
- La retención y el control de los bloques de calibración
- Extensión de la exploración y / o el volumen a escanear
- El almacenamiento de registros
- Informar sobre los requisitos

Para cada examen de ultrasonido se tendrá que llevar a cabo las siguientes indicaciones:

1. Identificación del proceso y revisión.
2. La identificación ultrasónica y su instrumento (incluyendo número de serie del fabricante).
3. Identificación de la unidad de búsqueda (incluyendo el fabricante de número de serie, la frecuencia, y el tamaño).
4. Angulo de haz que se utiliza.
5. Acoplador usado, marca o tipo.
6. Cables de la unidad de búsqueda utilizados, tipo y la longitud.

7. Equipos especiales cuando se utilizan (unidades de búsqueda, cuñas, zapatos, equipo de escaneo automático, equipo de grabación, etc.).
8. La identificación del programa informático y la revisión cuando de usa.
9. Identificación del bloque de calibración.
10. Bloque de simulación y la identificación electrónica simulada cuando se utiliza.
11. El aumento de nivel de referencia y el instrumento, si se usa, amortiguación y ajuste de rechazo.
12. Los datos de calibración (incluida la referencia reflector, indicación de amplitudes, y las distancias de lectura).
13. Correlacionar los datos de bloque de simulación y electrónicos simuladores, cuando se usa, con la calibración inicial.
14. La identificación y ubicación de la soldadura del volumen escaneado.
15. Superficies en la que se llevó acabo el análisis, incluyendo estado de la superficie.
16. Mapa o registro de indicaciones detectadas o rechazables y despejadas.
17. Las zonas de acceso restringido o soldaduras inaccesibles.
18. Análisis de la identidad personal y cuando sea requerido por referencia a la sección del código, el nivel de calificación.
19. Fecha del examen.

Los artículos que van desde el 2 hasta 13 pueden ser incluidos en el registro de calibración independiente, siempre y cuando la identificación del registro de calibración se incluya en el registro del examen.

En primer lugar se debe seguir lo que dice la tabla T. 522.1, que tiene relación con el examen escrito que se debe realizar.

El requisito con el que el examen ultrasónico deberá llevarse a cabo, con la conformidad de un proceso escrito que tendrá, como mínimo, los requisitos

enumerados en la tabla T-522. El procedimiento escrito deberá establecer un solo valor o rango de valores para cada requisito.

TABLA T-522
VARIABLES DE UN PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN POR
ULTRASONIDO

| REQUERIMIENTO | Requerimiento esencial | Requerimiento no esencial |
|--|-------------------------------|----------------------------------|
| Tipos de materiales y configuraciones para ser examinados, incluyendo el grosor, dimensiones y producto. (Fundición, forja, etc.). | X | |
| Las superficies de las cuales se realiza el examen. | X | |
| Técnica (s) (viga recta, ángulo de haz, contacto y / o inmersión). | X | |
| Ángulo (s) y el modo (s) de propagación de la onda en el material. | X | |
| Buscar tipo de unidad (s), la frecuencia (es \ y tamaño de elemento (s) / forma (s)) | X | |
| Unidades especiales de búsqueda, cuñas, zapatos, sillas de montar, o cuando se utilizan. | X | |
| Instrumento ultrasónico (s). | X | |
| Calibración (bloque de calibración (s) y la técnica (s)). | X | |
| Direcciones y el alcance de la exploración. | X | |
| Escaneo (manual vs automática). | X | |
| Método para el dimensionamiento de indicaciones. | X | |

| | | |
|--|---|---|
| Adquisición ordenador mejorada de datos, cuando se utiliza. | X | |
| Escanear superposición (sólo disminuirá). | X | |
| Requisitos de desempeño de personal, cuando sea necesario. | | X |
| Requisitos de cualificación de personal. | | X |
| Estado de la superficie (superficie de exploración, bloque de calibración) Acoplador: nombre de marca o tipo. | | X |
| Técnica de limpieza después de la examinación. | | X |
| Automático de alarma y / o equipo de grabación, en su caso. | | X |
| Los registros, incluyendo los datos de calibración mínimos a registrar (por ejemplo, instrumentos y ajustes). | | X |

Luego de cumplir con las exigencias mínimas requeridas por la T-522 se procederá a mencionar otros aspectos de relevancia para poder realizar este análisis de ultrasonido a un equipo térmico como lo son las indicaciones específicas del equipo a utilizar, unidades de búsqueda como frecuencia, cuñas de contacto y acoplador.

Según el código en su punto T-531, un equipo de eco-pulso ultrasónico se utiliza en el intervalo de frecuencias que va desde 1 MHZ a 5 MHZ y será equipado con un control de ganancia escalonada en unidades de 2,0 dB o menos. Si el instrumento tiene un control de amortiguación puede ser utilizado, si no reduce la sensibilidad de la exploración. El control deberá rechazar estar en posición "off" para todos los exámenes a menos que se pueda demostrar que no afecta la linealidad de la exploración.

Las unidades de búsqueda según el T-532 son de una frecuencia nominal que será de 1 MHz a 5 MHz. Sujeto a variables dependiendo de la estructura del grano del material de producción donde variará para obtener una adecuada penetración o mejor resolución.

En el punto T-533 los acopladores, incluidos los aditivos, no deben perjudicar el material que está siendo examinado. Los acopladores especificados en la T.533.1 son:

- A) acopladores utilizados de aleaciones con base níquel no deben contener más de 250 ppm de azufre
- B) acopladores utilizados en acero inoxidable auténticos o titanio no deberán contener más de 250 ppm de haluros (cloruros además de fluoruros)

6.1. T-534 bloques de calibración

El material a partir del cual se fabrica el bloque deberá ser de la misma forma del producto, material de especificaron o equivalente a su agrupación por número (P-numero) y el tratamiento térmico como la del material que esta siendo examinado.

T-534.1 Bloques de calibración para productos tubulares:

- a) Los reflectores deben ser longitudinales (axial) y las muescas tendrán una longitud que no exceda de 1 pulgada (25mm), una anchura de 1/16 pulgada 1.5mm, y la profundidad que no exceda de 0.0004 pulgadas (0.10mm) o 5% de la tensión nominal del espesor de la pared se acepta el que se mayor de los dos.

b) El bloque de calibración debe ser lo suficientemente largo para simular el manejo del producto que se examinó a través del material de examen.

T-534.2 Bloques de calibración de fundición:

El bloque deberá tener el mismo espesor +/- 25% del que será examinado

T-560 CALIBRACION

6.2. T-562 requisitos generales de calibración

T-562.1 sistema de ultrasonido:

Las calibraciones se llevaran a cabo con el sistema de ultrasonido completo y con el uso del rango de espesor bajo examen

T-562.2 Superficie de calibración

Se realizaran calibraciones desde la superficie (revestido o sin revestimiento; cóncava o convexa) correspondiente a la superficie del material en donde se llevara a cabo el examen.

T-562.3 Acoplador

El mismo medio de acoplamiento se utilizara en el examen como en la calibración.

T-562.4 Cuñas de contacto

Se ocuparan las mismas cuñas de contacto en la calibración como en el examen.

T-562.5 Controles del instrumento

Cualquier control que afecte la linealidad del instrumento (por ejemplo, los filtros o un recorte), deberán estar en la misma posición para la calibración al momento de chequear la linealidad del instrumento y por ende en la del examen.

T-562.6 Temperatura

Para el examen de contacto la diferencia de temperatura entre el bloque de calibración y superficie de examen deberán estar dentro de 14° C. Para examen de inmersión, la temperatura del medio de acoplamiento para la calibración deberá estar dentro de 14°C de la temperatura acoplante para su examen.

6.3. T-563 Confirmación de la calibración

T-563.1 Cambios en el sistema

Cuando cualquier parte del examen se cambia del sistema, se realiza una comprobación de calibración en el bloque de calibración para verificar que los puntos del rango de distancia y ajuste de sensibilidad cumple los requisitos.

T-563.2 Controles de calibración

Una verificación de la calibración en al menos unos de los reflectores en el bloque de calibración o comprobar el uso de un simulador se realizara a la finalización de cada examen o serie de exámenes similares, y cuando el

personal de examen (excepto automatizado de equipos) se cambian. El rango de valores distancia y sensibilidad deben cumplir los requisitos de T-563.3. Nota: Las comprobaciones de calibración interinas entre la calibración inicial requerida y la comprobación de la calibración final puede llevarse a cabo. La decisión de realizar verificación de la calibración provisionales deben basarse en la estabilidad del instrumento ultrasónico, el riesgo de tener que realizar nuevos exámenes, y la ventaja de no llevar a cabo pruebas de calibración provisionales.

T-563.3 Confirmación de valores de aceptación

T-563.3.1 Distancia de los puntos del rango

Si cualquier distancia punta rango se ha movido en la línea del barrido de más de 10% de la lectura a distancia ofther o 5% del total del barrido (lo que es mayor), corregir la calibración rango de distancia y la nota de corrección en el registro del examen.

6.4. T-563.3.2 Ajustes de sensibilidad

Si cualquier ajuste de sensibilidad ha cambiado en más de un 20% o de 2 dB de su amplitud, corregir la calibración de la sensibilidad y tenga en cuenta la corrección en el registro del examen. Si el ajuste de sensibilidad tiene disminución, todas las hojas de datos desde la última calibración valida se marcara vacío y la zona que abarca los datos anulados será reexaminada. Si el ajuste de sensibilidad se ha incrementado, todas las indicaciones grabadas desde la última calibración válida deberán ser revisadas y sus valores se pueden cambiar en las hojas de datos y volver a grabar.

6.5. T-564 Calibración complementaria para exámenes con haz angular

Para los exámenes de haz angular complementario, el instrumento ganancia se ajustara durante la calibración de manera que la indicación del taladro transversal producirá una amplitud más alta del 80% o, +/- 5% de la altura de la pantalla completa. Este será el nivel de referencia primario.

CAPITULO 7: DESCRIPCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL EQUIPO EPOCH 1000I

Como primera consideración para poder realizar el examen de ultrasonido a un equipo térmico es necesario conocer más a fondo el equipo con el que se trabajará, para así ocupar de una manera más completa el equipo y realizar el examen de forma óptima.

A continuación se presentan las principales características técnicas que posee el equipo de ultrasonido que permitirá realizar el examen.

7.1. OLIMPUS EPOCH 1000i

Los equipos de la serie EPOCH 1000 son detectores de defectos digitales y portátiles que combinan el gran rendimiento de detección de los ultrasonidos convencionales con la eficacia de las imágenes phased array. El EPOCH 1000i se caracteriza por su nuevo diseño horizontal, la pantalla VGA, la perilla y flechas de dirección para la navegación y el ajuste de los parámetros, y la conformidad a la norma EN12668-1. El alcance de las funcionalidades ultrasónicas de los detectores de la serie EPOCH 1000 es ampliado gracias a la representación de imágenes phased array del EPOCH 1000i (ver figura 7.1)



Figura 7.1 **OLIMPUS EPOCH 1000i**

7.1.2. Características principales

- Paquete de herramientas para la representación phased array disponible. Conforme a la norma europea EN12668-1.
- Selección de más de 30 filtros digitales para el receptor.
- Frecuencia de repetición de impulsos de 6 kHz para exploraciones de alta velocidad.
- Reconocimiento automático del palpador phased array.
- Calibración intuitiva del retardo de la zapata y de la sensibilidad para todas las leyes focales.
- Salidas analógicas y de alarma programables.
- Índice de protección ambiental IP66.
- Diseño horizontal, panel de navegación y perilla para el ajuste de los parámetros.
- Receptor digital de gran rango dinámico.
- Pantalla VGA con imágenes legibles bajo la luz del sol.
- Función de visualización Clear Wave para la interpretación A-scan convencional.
- Cursores de referencia y de medición.
- Curvas dinámicas DAC/TVG estándares.
- Diagramas DGS/AVG integrados.

7.1.3. Referencias del equipo

EPOCH 1000i Inspecciones avanzadas por ultrasonidos más representaciones phased array integradas.

El EPOCH 1000i integra de manera estándar la representación *phased array* y las mismas capacidades de detección por ultrasonidos que el EPOCH 1000.

7.1.4. Principales industrias y aplicaciones

- Inspecciones generales de soldaduras.
- Detecciones y mediciones de grietas.
- Inspecciones en centrales de generación de energía.
- Inspecciones de soldaduras según la norma AWS D1.1/D1.5.
- Inspecciones de defectos en piezas fundidas y forjadas.
- Mediciones de defectos con diagramas DGS/AVG.
- Integración y escaneo de base.
- Inspecciones de defectos y laminación en compuestos.
- Industria aeroespacial y de mantenimiento.
- Industria automotriz y del transporte.

7.2. Detector avanzado de defectos, con representaciones phased array herramienta estándar en el epoch 1000i

El EPOCH 1000*i* es un equipo portátil y robusto que combina poderosas herramientas de ultrasonidos convencionales y phased array para la detección de defectos. Ellas incrementan la probabilidad de detección de defectos, mejoran la nitidez de las zonas de interés y aumentan la eficacia de inspección, ya que sólo basta una única configuración para visualizar los A-scan de múltiples ángulos (leyes focales), lo que elimina la necesidad de utilizar varios palpadores y zapatas. Una de las características de este equipo es que mantiene el rendimiento excepcional de los ultrasonidos convencionales del EPOCH 1000 lo que asienta la confianza en la inspección, pero, además, ofrece las ventajas de las representaciones phased array. Así, El EPOCH 1000*i* no solamente satisface las exigencias de las normas de inspecciones, pero ofrece, además, la ventaja de las representaciones phased array para aumentar la precisión y la eficacia.

Disponibles con la configuración estándar 16:16, el EPOCH 1000*i* cuenta con varias herramientas de medición que facilitan la inspección de los defectos. Unas de éstas son las imágenes A-scan y S-scan, y los cursores de referencia y de medición para la evaluación de las dimensiones de los defectos. Cabe destacar, también, la herramienta DAC/TVG para todas las leyes focales, que permite caracterizar el defecto en un A-scan según la curva DAC adquirida.

7.3. Especificaciones de los ultrasonidos phased array del Epoch1000i

| | |
|-------------------------------------|--|
| Leyes focales | 60 |
| Palpador | 16 elementos |
| Apertura virtual de palpador | 16 elementos |
| Filtro de video | Desactivado, bajo, alto |
| Imágenes | A-scan, A-scan/S-scan, S-scan |
| Velocidad de actualización | 60 Hz para todos los A-scan; 20 Hz para todas las imágenes |

7.4. Palpadores phased array del EPOCH 1000i

El EPOCH 1000*i* soporta una nueva serie de palpadores phased array capaces de satisfacer las exigencias de las inspecciones críticas. Esta serie incluye palpadores especializados para satisfacer las demandas de normas particulares y palpadores estándares para inspecciones comunes de soldaduras, como los palpadores phased array con zapata integrada.

7.5. Cambio rápido entre los ultrasonidos convencionales y los phased array

El EPOCH 1000*i* es compatible con todos los palpadores monocristales estándares. El cambio entre el modo ultrasonidos convencionales y phased array es tan fácil como pulsar un botón. Este sencillo cambio entre los modos de inspección del EPOCH 1000*i* permite aprovechar las ventajas conjuntas de los ultrasonidos convencionales y phased array.

7.6. Curvas DAC/TVG estándares para todas las leyes focales

El EPOCH 1000*i* está dotado de la herramienta estándar de curvas DAC/TVG para todas las leyes focales. Ésta permite adquirir una curva DAC o crear una configuración TVG a partir de reflectores conocidos para todos los ángulos y leyes focales definidos al mismo tiempo. Después de completar configuración, la imagen S-scan permite detectar defectos potenciales en varias leyes focales.

7.7. Normas de inspección de soldaduras AWS

El EPOCH 1000*i* cuenta con la calculadora AWSD1.1/D1.5 para la clasificación de la soldadura. Esta calculadora, cuando es utilizada con el palpador phased array de Olympus certificado AWS, permite utilizar las representaciones de imágenes durante la medición de defectos a 45°, 60° y 70° con la técnica convencional A-scan. También es posible ver en la pantalla el valor de clasificación de soldadura de tipo «D» del A-scan seleccionado (ley focal).

7.8. Imagen simultánea del A-scan y S-scan

La imagen simultánea del A-scan y S-scan del EPOCH 1000*i* muestra los datos A-scan de todos los ángulos que se encuentran entre los dos valores personalizados de inicio y de fin. Cada ángulo (denominado generalmente ley focal) puede ser seleccionado y el A-scan respectivo aparece en la pantalla en tiempo real. Así y gracias a las representaciones phased array, es posible detectar y caracterizar los defectos potenciales en diversos ángulos al mismo tiempo.

7.9. Calibración del equipo

Antes de efectuar una calibración es importante efectuar un procedimiento de verificación y de configuración de bases.

- Verificar que este en el modo UT (ultrasonido convencional), el cual activa automáticamente el modo de inspección A-scan.
- Seleccionar un valor adecuado de ganancia para efectuar la calibración, permitiendo aumentar o disminuir la amplitud de la señal, en el caso de

desconocer el valor inicial de decibeles es recomendable probar inicialmente con 20 dB (de ser necesario se debe modificar este valor para obtener una amplitud de señal de mejor notoriedad).

- Verificar en pantalla, que el parámetro de velocidad no está desactivado en el modo tiempo de vuelo. En la selección 3/5>Ajuste medición[F2], seleccionar el parámetro Unidad pulsando la tecla [P2], configurando la unidad en mm, activando de este modo el parámetro de la velocidad.
- En la selección 1/5>Base[F1] se encuentran los parámetros Velocidad, Cero, Rango y Retardo. La Velocidad y el Rango se modifican dependiendo del tipo de bloque de calibración, en cambio para los parámetros Cero y Retardo se deben ajustar los valores a 0.000 μ s y 0.00 respectivamente.
- Ubicarse en la selección 1/5>Disparo[F4], seleccionar el parámetro Angulo pulsando [P1] para introducir el ángulo del palpador seleccionado.
- En la segunda selección 2/5>Puerta 1[F1], seleccionar el parámetro Estado pulsando [P7] y activar la Puerta 1.

Lo que el examen conlleva es realizar la calibración del equipo para un haz recto, esto quiere decir que el transductor a utilizar será recto, que es el que sirve para realizar la medición de espesores, la cual en el siguiente capítulo se detallará.

7.9.1. Calibración con un transductor recto.

Para la calibración del equipo con un palpador recto se deben seguir los siguientes procesos:

1. Verificar el tipo de bloque de calibración y el tipo de palpador a utilizar, en nuestro caso:

- Bloque calibración: Escalonado 2214M (SAE-1018).
- Tipo transductor: A109S 5MHz/.5".

2. Ajustar el ángulo en 0°

3. Modificar los valores de la selección 1/5>Base[F1] que se detallan a continuación:

- Velocidad: 5900 m/s.
- Rango: 25 mm.

Dato: la velocidad de propagación de la onda dependerá del tipo de material en el cual se realizara el examen o en el material de calibración. El rango será de 25 (mm) ya que se aconseja sea el doble de la máxima medida del bloque calibre, que en este caso es de 12,5 (mm).

4. En la selección 1/5>Emisor[F2], están presentes los siguientes parámetros: Modo PRF, PRF, Energía, Amort. (Amortización), Modo, Emisor y Frec. (Frecuencia). En cada parámetro se realizaran las siguientes selecciones:

- Modo PRF: Auto min
- Energía: 100 V
- Amort.: 50 Ω
- Modo: Eco- Pulso
- Emisor: Cuadrado
- Frecuencia: 5 MHz
- Al seleccionar modo eco-pulso, automáticamente da ondas longitudinales y transversales

5. Luego en la selección 1/5>Receptor[F3], encontraremos los siguientes parámetros: Grupo filtro, Filtro, Rectif. (Rectificado) y Supres. (Supresión). Modificar solo el parámetro Filtro, pulsando la tecla [P2]:

- Grupo filtro: Standard
- Filtro: 1,5-8,5
- Rectif.: Completa
- Supres.: 0

6. En la selección 1/5>Disparo[F4], aparecen los siguientes parámetros: Angulo, Esp. (Espesor), Valor X ,CSC y Diámetro. Desactivar el parámetro CSC.

7. Ubicarse en la selección 1/5>Base [F1], seleccionar la función Auto Cal. presionado la tecla [F5].

8. Una vez realizado el procedimiento, se utiliza el bloque de calibración 2214M (pieza escalonada) con niveles que van de 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mm y 12.5 mm. Utilizar el gel acoplante al bloque y realizar el primer contacto en el escalón de espesor 7.5 mm (ver figura 7.2)

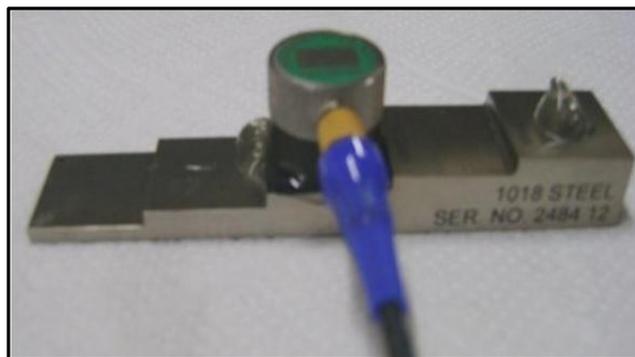


Figura 7.2 Bloque de calibración 7.5 mm

9. Luego de acoplar el palpador en el nivel de 7,5 mm, presionar la tecla rápida [GATE], la cual activa la puerta P1 Inicio, esta se debe ubicar donde existe la primera variación de amplitud y realizar un Auto 80% presionado las siguientes teclas [2NDF]+[GATE]. (ver figura 7.3)



Figura 7.3 Calibración 7.5 mm

10. En la selección 1/5>Base[F1], en la función Auto Cal.[F5] seleccionar el parámetro Cal. Cero pulsando la tecla [P3], e ingresar el valor de 7.5 mm (ajustar el valor girando la perilla), como se ilustra en la figura . Pulsar aceptar.

11. Lo que sigue es cambiar de posición el palpador sobre el nivel de profundidad 12.5 mm. (ver figura 7.4)

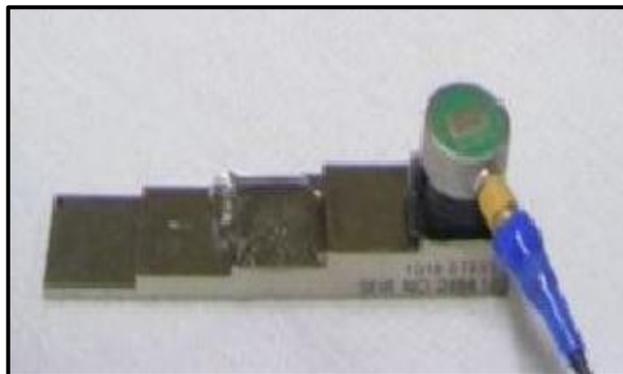


Figura 7.4 Bloque de calibración 12.5 mm

12. Mover la puerta P1 con la perilla, donde se encuentra la variación de amplitud en pantalla y aplicar un Auto 80% [2NDF]+[GATE].

13. Seleccionar el parámetro Cal. Velocidad presionando la tecla [P2], agregar el valor de 12.5 mm. Presionando aceptar se termina la calibración del equipo de ultrasonido para un palpador recto (ver figura 7.5)



Figura 7.5 Parámetro Cal. Velocidad

Una vez hecho este proceso el equipo ya se encuentra calibrado de forma óptima para el tipo de examen que se necesita realizar, por lo que ahora se podrá pasar al procedimiento de mediciones experimentales en un equipo térmico.

El equipo tiene distintas formas de uso para múltiples tipos de inspecciones, por lo que posee diferentes tipos de calibración, como lo son:

- Calibración de un palpador con zapata
- Calibración modo Phased Array (PA).
- Calibración con zapata recta
- Calibración con zapata angular

CAPITULO 8: MEDICIONES EXPERIMENTALES EN EL EQUIPO TÉRMICO

Luego de explicar el modo de calibración que se necesita para realizar la inspección ultrasónica con el equipo de ultrasonido Epoch 1000i, se deben realizar las mediciones experimentales al equipo térmico.

Este examen fue realizado a una caldera que se encuentra en el Hospital Naval de Talcahuano, gracias a la ayuda de un alumno de la Universidad del Biobío, quien facilitó el permiso para poder realizar el ensayo.



Figura 8.1 Caldera escocesa a examinar.



Figura.8.2 Cara frontal de la placa de la caldera examinada.

Las características técnicas que el equipo térmico posee son:

- Caldera de vapor automática tipo escocesa
- Horizontal
- Doble llama de retorno
- Fogón corrugado.
- Fabricación: SOCIEDAD CONSTRUCCIONES METALICAS S.A
- Marca: "STEAMBLOCK 400"

- Producción: de 4.545 kg/h
- Potencia: 303 hp
- Consumo: 314 l/h
- Numero de quemadores: uno completo e integral, tipo atomización por progresión mecánica B2- 12M.
- Presión de trabajo: 120 psi
- Numero de tubos: 114 tubos soldados de 3" de diámetro, espesor 2,9 mm

Accesorios:

1. Un manómetro indicador de presión graduado de 0-25 Kg/cm²
2. Un alimentador automático "MC DONELL MILLER" 150
3. Tres conco de prueba para purgar y sacar aguas de pruebas
4. Un nivel tipo común de 1/2" x 12. 3/4" alto
5. Una válvula tipo globo de salida de vapor de 6" de diámetro
6. Dos válelas de extracción de fondo 2" de diámetro
7. Un ventilador horizontal "WANSON" tipo MP1-2 accionado por motor
8. Dos válvulas de seguridad de 4" admisión y 4" descarga
9. Una válvula magnética de 3 vías
10. Un trasportador de ignición alta tensión, 220 volts a 5.000 volts
11. Dos manómetros graduados de 0-80 Kg/cm²
12. Un manómetro indicador de temperatura de petróleo
13. Una válvula magnética paso de gas "SINGER" modelo 73
14. Un filtro de petróleo tipo de placas 7140
15. Una bomba de alimentación de petróleo a motor eléctrico
16. Una válvula admisión de petróleo "BOA" ND16-25
17. Dos válvulas, marca "BOA" ND16-25

8.1. Etapas y áreas de examen.

La medición indirecta de espesores de pared de recipientes a presión y recipientes portátiles utilizando la técnica ultrasónica de pulso eco, se llevará a cabo cuando el cliente así lo solicite. Para casquetes y envoltentes, el número de lecturas por punto de inspección dependerá del diámetro del recipiente.

8.1.2. Diámetro del recipiente número de lecturas (mínimo)

- Hasta 30"----- 04
- Mayores de 30" y hasta 80"----- 08
- Mayores de 80"----- 12

Al tener un diámetro de entre 70" y 80" (diámetro real de 73,4645") fue necesario realizar a lo menos 8 lecturas en distintos puntos de la placa que se examinó, siendo 12 el número de mediciones elegido para realizar el examen. Las lecturas serán distribuidas en la periferia del recipiente y en el sentido de las manecillas del reloj.

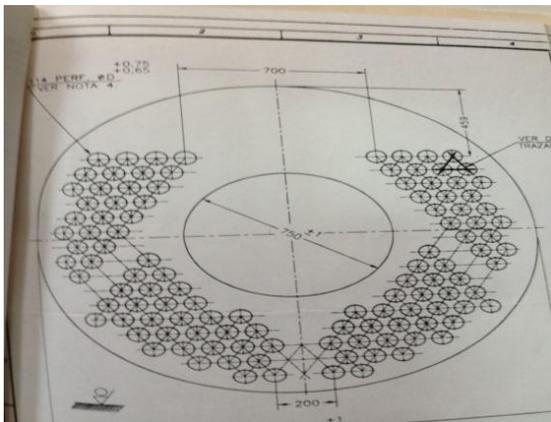


Figura 8.3 Plano frontal de la Caldera



Figura 8.4 Marcado de puntos (sentido horario) para medir espesor en placa de caldera.

CARA FRONTAL PLACA DE CALDERA



Figura 8.5 Placa frontal caldera

Punto donde se realizara medición de espesor con palpador.

Esta placa se marca con 12 puntos equidistantes, entre sí, para poder medir el espesor como establece la norma. En cada punto se debe tomar una medición de espesor.

8.1.3. Marcado de Puntos de Inspección.

El marcado de cada nivel y su identificación en la dirección longitudinal será numérico, empezando con el número 1 y tomando como referencia la posición horizontal: extremo Norte a Sur, extremo Este a Oeste, entrada hombre, placa de identificación, parte frontal a posterior o entrada de fluido;

vertical (de abajo hacia arriba). El marcado de cada punto circunferencial y su identificación será alfabético empezando con la letra A y tomando como referencia la posición (horizontal: parte superior; vertical: lado norte), en el sentido de las manecillas del reloj.

8.2. Desarrollo de la inspección



Figura 8.6 Verificación de espesores antes de realizar el examen

8.2.1. Preparación de las Superficies.

Hasta donde sea prácticamente posible se deberá eliminar la pintura suelta en los puntos de inspección; en este caso realizar la calibración como se realizó anteriormente y proceder a hacer la medición de espesores. Sin embargo si en la inspección visual se considera que la pintura tiene buena adherencia, no será necesario eliminar la pintura y se seguirá el procedimiento que se menciona. Se deberá eliminar cualquier material extraño que pudiera interferir con el examen, tal como grasa de inspecciones anteriores, suciedad, grumos de pintura, grumos de soldadura, aceite, etc.

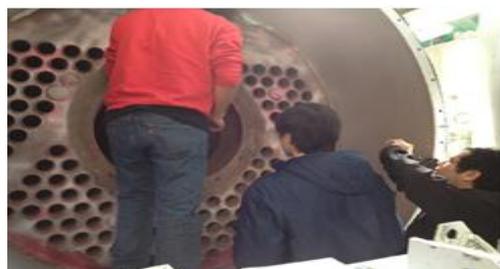


Figura 8.7 Eliminación de últimos residuos antes de la medición

Todas las condiciones de operación, como son: acabado superficial, frecuencia, calibración del instrumento ultrasónico, tipo de palpador y acoplante empleado, deben ser las mismas durante la calibración y las inspecciones.

Para empezar a realizar el examen se necesita cumplir con los siguientes requisitos:

a) La calificación/ requisitos de certificación del personal

En este caso serán los alumnos de este seminario quienes realizarán el examen, contando con la ayuda de otro alumno con un mayor manejo del equipo, además de clases de capacitación realizadas anteriormente con el equipo de ultrasonido.

b) Requisitos de procedimientos/ demostración, capacitación y aceptación

El procedimiento requiere un equipo de ultrasonido, además de una limpieza de los puntos a medir, dejando la superficie de manera apta para la inspección. Luego de una revisión de la persona a cargo de la caldera, quien dio el permiso para realizar la medición.

c) Las características del sistema del examen

Se realizará un examen de ultrasonido de medición y verificación de espesores a una de las placas de la caldera.

d) Retención y control de los bloques de calibración

Bloque de calibración especificado en la norma. Bloque escalonado (ver figura 7.2 del Capítulo 7)

e) Extensión de la exploración y / o el volumen a escanear

La exploración se realizó en la placa de caldera escocesa con un volumen de $0.008 m^3$

f) Almacenamiento de registros

Registros almacenados en el equipo de ultrasonido en cada una de las mediciones realizadas especificadas en la sección 8.4 de este capítulo.

g) Informar sobre los requisitos

Los requisitos que se deben cumplir son informados al profesor guía y al encargado de la caldera.

8.3. Tabla T-522. Variables de un procedimiento de investigación por ultrasonido

a) Tipos de materiales y configuraciones para ser examinados, incluyendo el grosor, dimensiones y producto. (fundición, forja, etc.):

- Acero: Ac 37-20 Cs. Calidad fogón de 22 mm refaccionada a 24 mm

b) Las superficies de las cuales se realiza el examen:

- Superficie plana de placa de caldera escocesa.

c) Técnica (s) (viga recta, ángulo de haz, contacto y / o inmersión):

- Técnica de viga recta.

d) Ángulo (s) y el modo (s) de propagación de la onda en el material:

- Angulo: 0°
- Modo: Ultrasonido.
- Propagación: Onda longitudinal y transversal.

e) Buscar tipo de unidad (s), la frecuencia (es \ y tamaño de elemento (s) / forma (s):

- Frecuencia: 5 MHz
- Unidad: milímetros mm

f) Unidades especiales de búsqueda, cuñas, zapatos, sillas de montar, o cuando se utilizan:

- No se ocuparon para este ensayo.

g) Instrumento ultrasónico (s):

- Equipo ultrasónico OLYMPUS EPOCH 1000i.

h) Calibración (bloque de calibración (s) y la técnica (s)):

- Calibración indicada en norma para haz recto con bloque patrón de calibración escalonado.

i) Direcciones y el alcance de la exploración:

- Dirección de la medición recta con un alcance de aproximadamente 24 mm de profundidad de placa de caldera escocesa.

j) Escaneo (manual v/s automática):

- Manual con técnica de eco-pulso

k) Método para el dimensionamiento de indicaciones:

- No se especifica.

l) Adquisición ordenador mejorada de datos, cuando se utiliza:

- No se utiliza.

m) Escanear superposición (sólo disminuirá):

- No se utiliza.

n) Requisitos de desempeño de personal, cuando sea necesario:

- Estudiantes con previa capacitación para ocupar equipo ultrasónico.

o) Requisitos de cualificación de personal:

- No requeridos.

p) Estado de la superficie (superficie de exploración, bloque de calibración).

Acoplador: nombre de marca o tipo.

- Superficie de exploración con imperfecciones, lo que conlleva a realizar limpieza en los puntos donde se necesita medir (retiro de suciedad, pintura).
- Bloque de calibración: Escalonado.
- Acoplador (gel acoplante)

q) Técnica de limpieza después de la examinación:

- Se procedió a dejar el área examinada limpia con elementos necesarios como lija y paños de limpieza.

r) Automático de alarma y / o equipo de grabación, en su caso.

- No se ocuparon

s) Los registros, incluyendo los datos de calibración mínimos a registrar (por ejemplo, instrumentos y ajustes):

- Datos de calibración mostrados en capítulo de calibración
- Registros guardados por el equipo ultrasónico y mostrados en capítulo de resultados de medición, siendo estos registros por cada medición realizada

8.4. Resultados del equipo

Una vez realizado el examen ultrasónico al equipo térmico, en este caso la placa central de la caldera escocesa, situada en el hospital naval de Talcahuano, procederemos a mostrar de una forma gráfica los resultados del presente, detallando cada punto de medición con el grafico y una tabla de resultados que arrojó la medición.

FOTOGRAFIA DE LOS PARAMETROS QUE MARCA EL EQUIPO AL MOMENTO DE REALIZAR UNA MEDICION

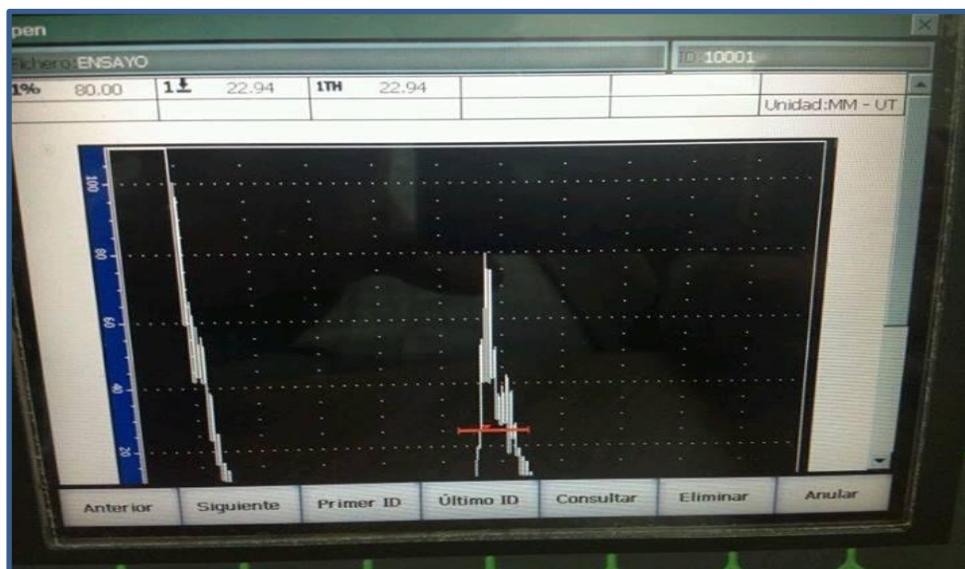


Figura 8.8 Resultados entregados por el equipo

El valor que marca la pantalla del equipo de 22.94 corresponde al espesor de la placa examinada. (Valor marcado en mm), esta medición se observara en todas las medidas realizadas variando el valor en cada medición.

| | | | |
|-----|-------|-----|-------|
| 1 ↓ | 22.94 | 1TH | 22.94 |
| | | | |

Figura 8.9 Medición de espesor

El primer valor marcado de 80.00, corresponde al ajuste de pantalla para poder visualizar de mejor manera, la gráfica del espesor medido. (Valor marcado en %).

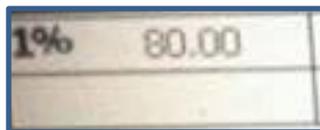


Figura 9 Ajuste de pantalla

Las figuras 9.1, y 9.2 corresponden a la primera medida realizada con el equipo a la placa de la caldera, para posteriormente realizar 11 mediciones más, y así aplicar los criterios mencionados por la norma ASME.



Figura 9.1 Midiendo en placa de caldera

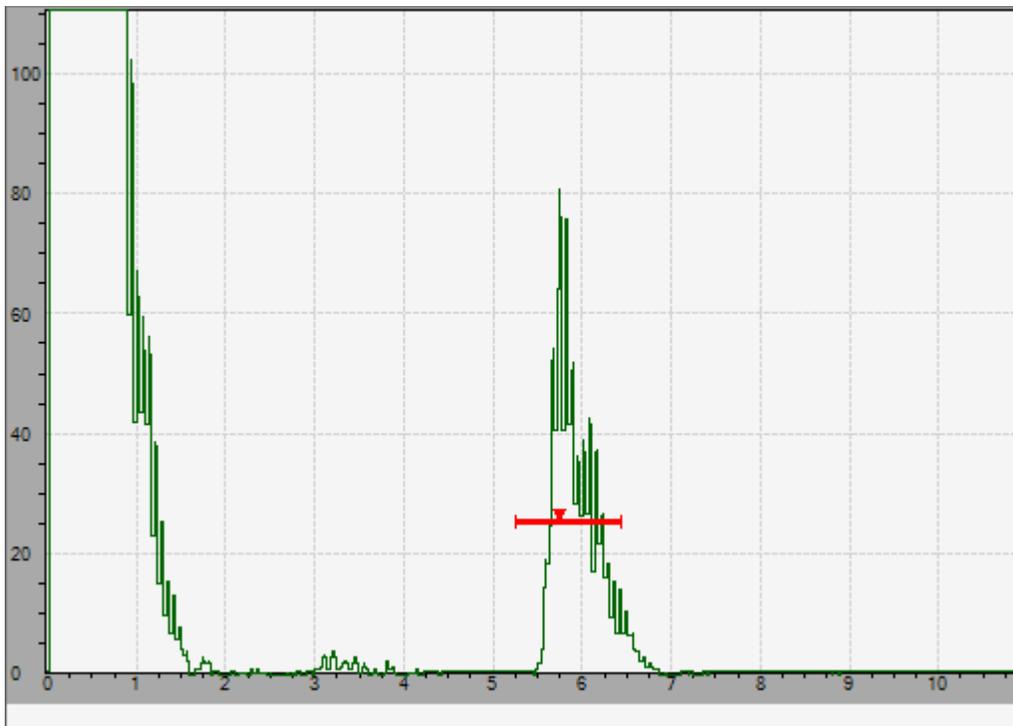


Figura 9.2 'Primera medición entregada por el equipo de

RESULTADOS EXPERIMENTALES ARROJADOS POR EL EQUIPO DE INSPECCIÓN A LA CALDERA.

Las formas de onda y espesores indicados a continuación, fueron obtenidos como muestra la Figura 8.8.

- Forma de onda, medición n° 1

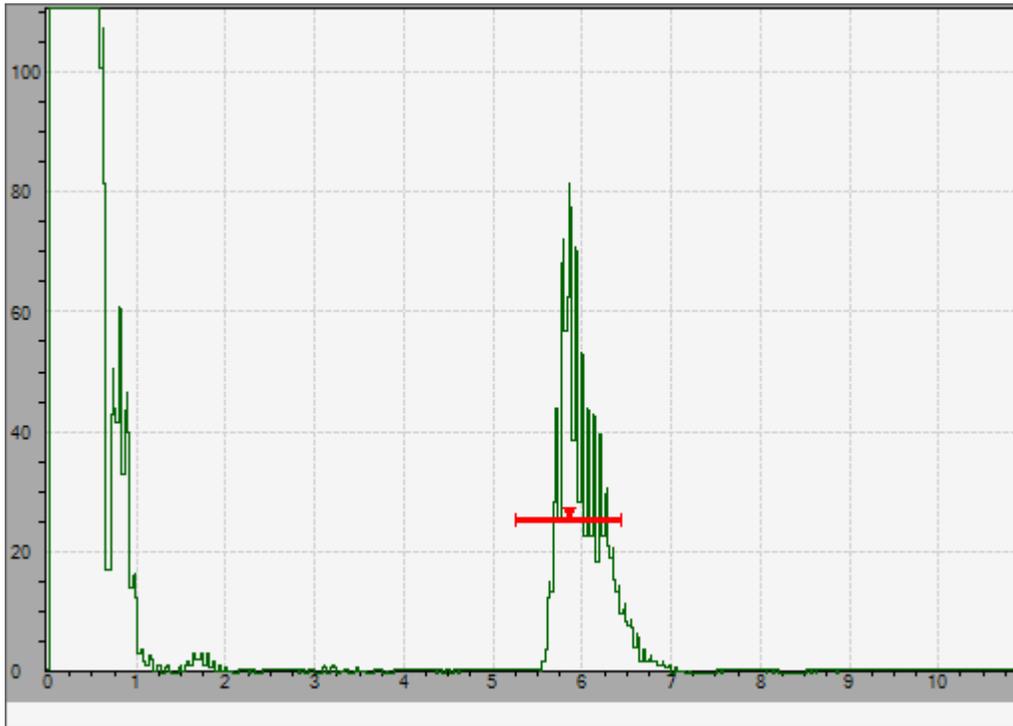


Espesor indicado en la medición: 22.94 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 46.5 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Full | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Inicio: 21.07 | Ancho: 4.77 | Nivel: 25 % | Alarma: Off |
|---------------|-------------|-------------|-------------|

- Forma de onda, medición n°2

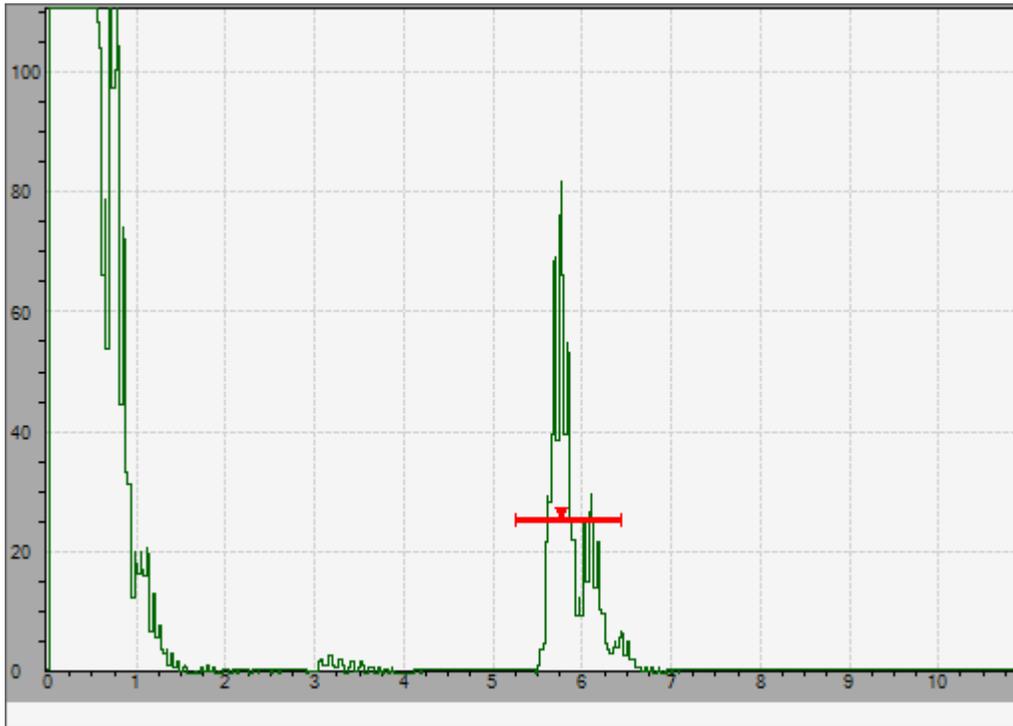


Espesor indicado en la medición: 23.38 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 40.7 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Full | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Inicio: 21.07 | Ancho: 4.77 | Nivel: 25 % | Alarma: Off |
|---------------|-------------|-------------|-------------|

- Forma de onda, medición n°3



Espesor indicado en la medición: 23.00 mm

| | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm |
| Gan.: 39.8 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Full |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados |

| | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Inicio: 21.07 | Ancho: 4.77 | Nivel: 25 % | Alarma: Off |
|---------------|-------------|-------------|-------------|

- Forma de onda, medición n°4

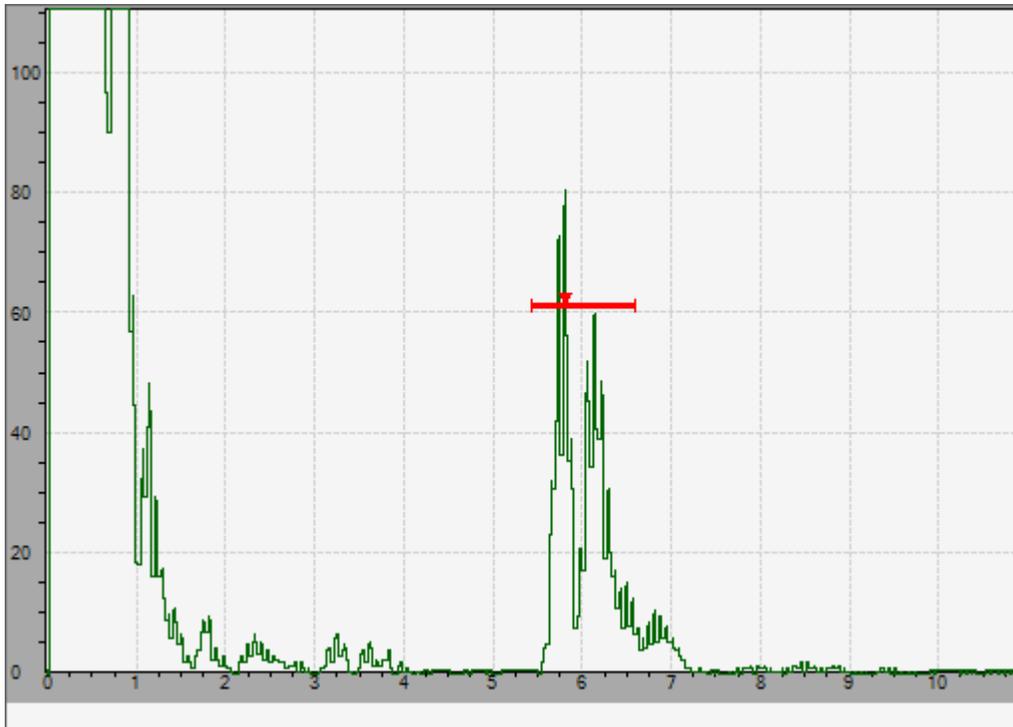


Espesor indicado en la medición: 22.91 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 37.7 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Full | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Inicio: 21.07 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60 % | Alarma: Off |
|---------------|-------------|-------------|-------------|

- Forma de onda, medición n°5



Espesor indicado en la medición: 23.16 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 51.9 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Full | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Inicio: 21.07 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60 % | Alarma: Off |
|---------------|-------------|-------------|-------------|

- Forma de onda, medición n°6

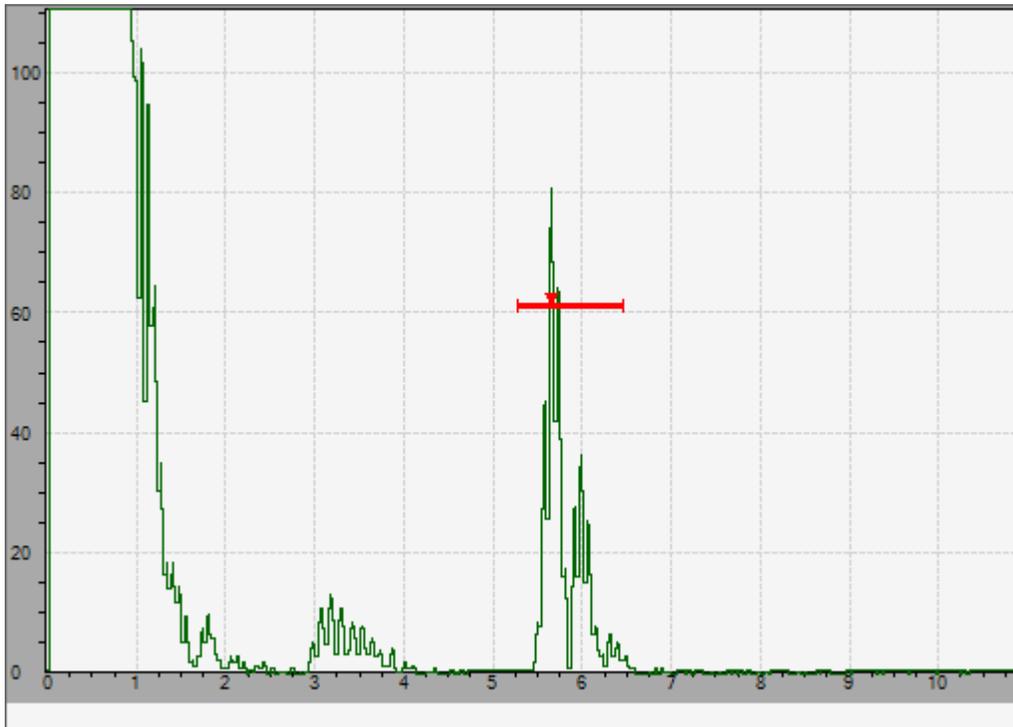


Espesor indicado en la medición: 22.63 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 53.8 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Full | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Inicio: 21.15 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60 % | Alarma: Off |
|---------------|-------------|-------------|-------------|

- Forma de onda, medición n°7

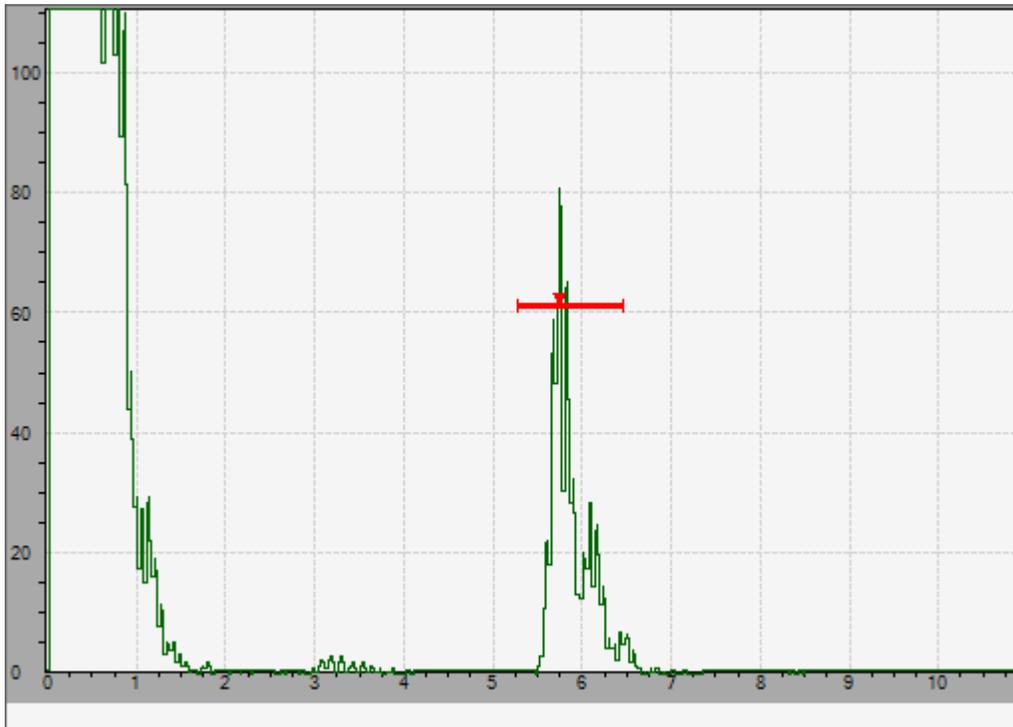


Medición de espesor: 22.56 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 51.9 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Completa | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|------------|--------------|
| Inicio: 21.15 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60% | Alarma: Off. |
|---------------|-------------|------------|--------------|

- Forma de onda, medición n°8.

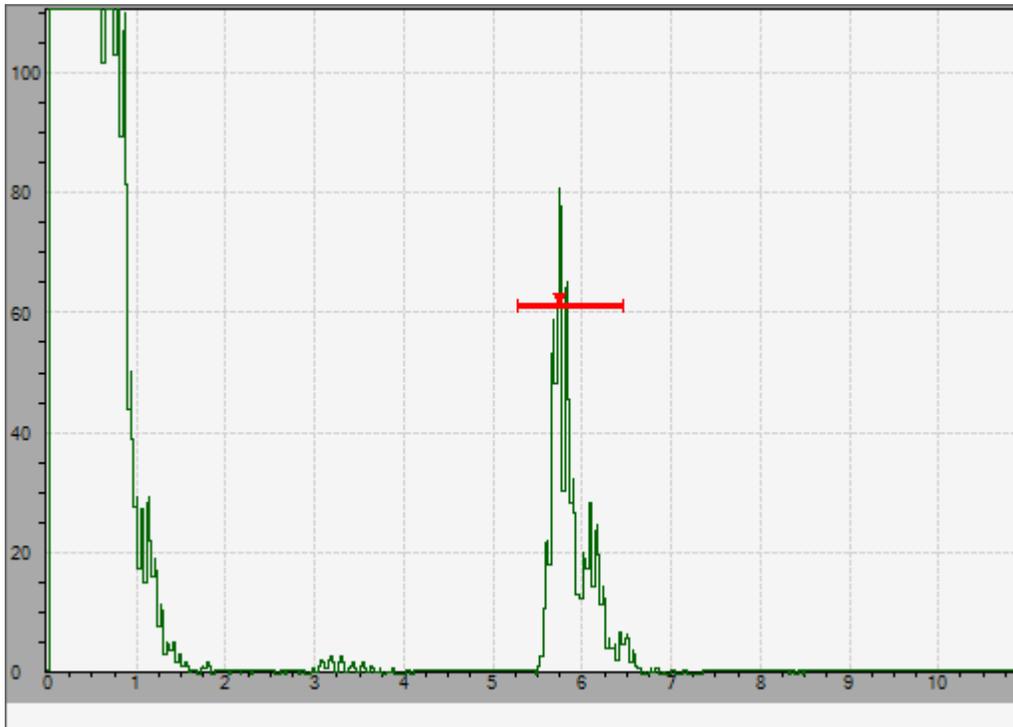


Medición de espesor: 22.94 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 43.8 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Completa | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|------------|--------------|
| Inicio: 21.15 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60% | Alarma: Off. |
|---------------|-------------|------------|--------------|

- Forma de onda, medición n° 9



Medición de espesor: 22.94 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 44.7 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Completa | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|------------|--------------|
| Inicio: 21.15 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60% | Alarma: Off. |
|---------------|-------------|------------|--------------|

- Forma de onda, medición n° 10

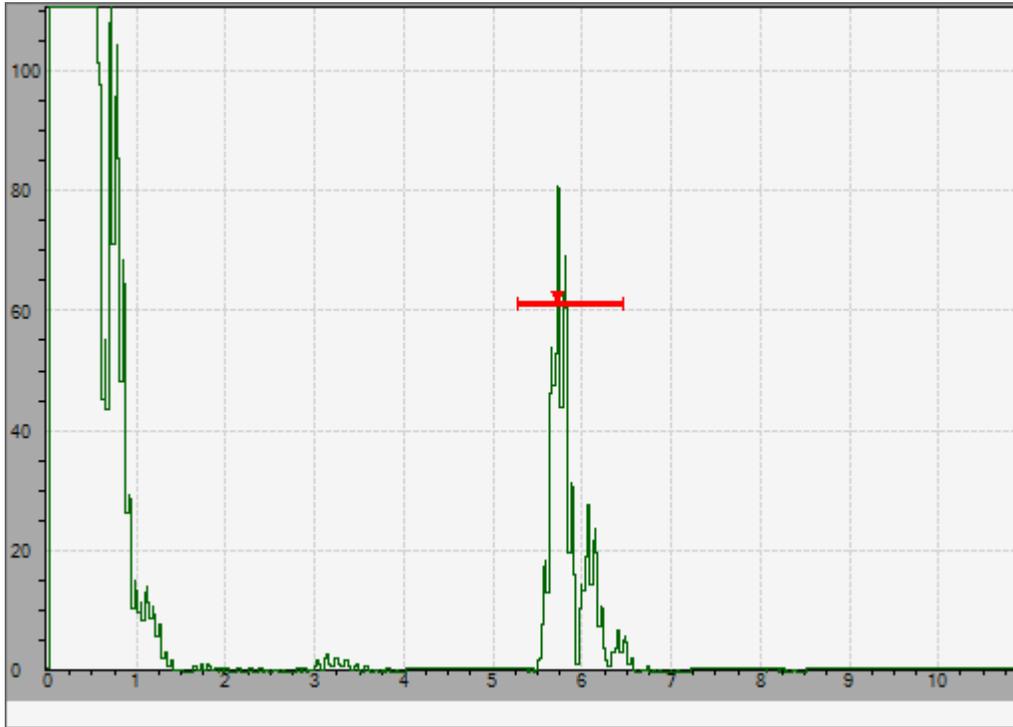


Medición de espesor: 22.88 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 40.2 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Completa | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|------------|--------------|
| Inicio: 21.15 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60% | Alarma: Off. |
|---------------|-------------|------------|--------------|

- Forma de onda, medición n°11

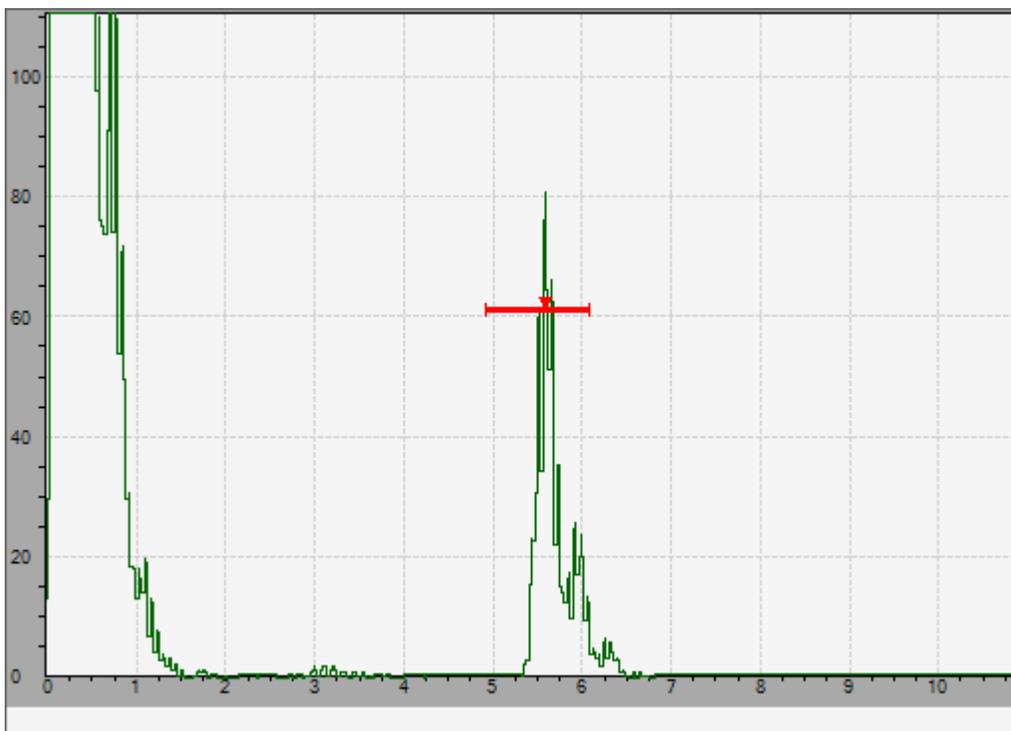


Medición de espesor: 22.87 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 39.99 mm | |
| Gan.: 40.2 dB | PRF: 960 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Completa | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|------------|--------------|
| Inicio: 21.15 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60% | Alarma: Off. |
|---------------|-------------|------------|--------------|

- Forma de onda, medición n° 12



Medición de espesor: 22.84 mm

| | | | |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Retardo: 0.00 | | Rango: 40.99 mm | |
| Gan.: 40.1 dB | PRF: 950 Hz | Modo: Pulso eco | |
| Velocidad: 5900 m/s | Frec.: 5.00 MHz | Filtro: 1.5 - 8.5 | |
| Cero: 0.748 μ s | Energía: 100 V | Rectif.: Completa | |
| Ángulo: 0.0 ° | Amort.: 50 Ω | Esp.: 0.00 | |
| Supres.: 0 | | Emisor: Cuadrados | |

| | | | |
|---------------|-------------|------------|--------------|
| Inicio: 21.15 | Ancho: 4.77 | Nivel: 60% | Alarma: Off. |
|---------------|-------------|------------|--------------|

ANEXO PLANILLAS ENTREGADAS POR EQUIPO EPOCH 1000

- Planilla n°1. Medición de espesores

| Database Name: epoch1000.tmp | | Survey Name: ENSAYO | | Criteria Type: INCREMENTAL | | Survey Description: 5MHZ | | Inspector Id: Sergio Castillo-Matias Inostroza | | Survey Date: 12/09/2013 15:10:00 | | Location Note: | | | | |
|------------------------------|------|---------------------|--------|----------------------------|--------|--------------------------|--------|--|--------|----------------------------------|--------|----------------|--------|---------|------------|------------|
| IDName | Type | Mode | MEAS_1 | UNITS_1 | MEAS_2 | UNITS_2 | MEAS_3 | UNITS_3 | MEAS_4 | UNITS_4 | MEAS_5 | UNITS_5 | MEAS_6 | UNITS_6 | GATE 1 LEG | GATE 2 LEG |
| 0001 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.94 | mm | 22.94 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0002 | FULL | UT | 80.50 | % | 23.38 | mm | 23.38 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0003 | FULL | UT | 81.00 | % | 23.00 | mm | 23.00 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0004 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.91 | mm | 22.91 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0005 | FULL | UT | 79.50 | % | 23.16 | mm | 23.16 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0006 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.63 | mm | 22.65 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0007 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.56 | mm | 22.56 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0008 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.94 | mm | 22.94 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0009 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.94 | mm | 22.94 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0010 | FULL | UT | 79.50 | % | 22.88 | mm | 22.88 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0011 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.87 | mm | 22.87 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0012 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.84 | mm | 22.84 | mm | | | | | | | OFF | |
| 0013 | FULL | UT | 80.00 | % | 22.84 | mm | 22.84 | mm | | | | | | | OFF | |

8.5. Conclusiones.

- La reducción máxima permitida en el espesor de pared no debe ser mayor al espesor correspondiente, en función de los parámetros aplicables a los recipientes a presión o recipientes portátiles.
- El espesor de pared en cualquier punto en que se determine que existen discontinuidades en la superficie interna tales como perforaciones o picaduras, debe estar dentro de las tolerancias especificadas para el recipiente a presión o recipiente portátil.
- Con los resultados mostrados podemos mencionar que al realizar el ensayo no destructivo mediante el ultrasonido a la caldera escocesa, específicamente en la placa posterior de esta, se acepta que los espesores arrojados son aceptados, ya que, cumple con los parámetros de aceptación, que se establecen para esta caldera, que son los de poseer espesores no menores al 30% del espesor real que se especifica en la ficha técnica.
- El caso de la caldera, según planos y documentos, el espesor es de 24 mm, dando como resultado en cada una de las 12 mediciones ningún valor bajo el criterio que se especifica. Por lo que podemos afirmar que el espesor de la placa examinado está apto para un buen funcionamiento del equipo térmico.
- Por último mencionaremos el último proceso, una vez examinado el equipo que es el de limpieza de las áreas inspeccionadas.

- Cuando se requiera o cuando se ocasionen problemas con algún proceso posterior, las superficies inspeccionadas deben limpiarse para eliminar los residuos de acoplante utilizado en la inspección, esto se puede realizar mediante un lavado con agua y detergente, con vapor desengrasante, o con solventes, siempre que sea necesario una vez terminada la inspección.
- En nuestro caso la superficie en examinación se dejó de manera óptima para un posterior uso del equipo.

A continuación se anexan políticas de procedimientos que aclaran el proceso que se lleva a cabo una vez realizado el examen no destructivo, debido a que por ser un seminario de investigación no se cuenta con la calificación exigida, por lo que no se pudo llevar a cabo el examen en un 100%.

8.6. Políticas del procedimiento

- En la ejecución de este Procedimiento, se deberá observar toda la normativa vigente, aplicándola según su orden jerárquico y especialidad. En caso de duda se observará la norma de rango superior.
- El personal que realice las inspecciones debe estar calificado y certificado de acuerdo al Procedimiento de Capacitación, Calificación y Certificación del personal de INTEGRIDAD Y CONFIABILIDAD que es según ASNT.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.

- En el área de la ingeniería mecánica la propagación de ondas ultrasónicas a través de un medio isotrópico ha encontrado aplicaciones muy importantes, fundamentalmente por la naturaleza no destructiva en el análisis de los componentes mecánicos de equipos térmicos, maquinaria e instalaciones. Las ventajas de este método están en que se pueden determinar las propiedades físicas de los materiales, detectar fallas de forma preventiva, descubrir la existencia de fisuras, desgaste de espesor, corrosión, entre otras; y con esto establecer si es necesario el cambio de alguna pieza mecánica.
- Para obtener un óptimo ensayo no destructivo se recomienda que el individuo que realizará la inspección cuente con la capacitación y certificación adecuada, según la labor que vaya a desempeñar en el proceso de examinación. El ensayo debe ser llevado a cabo bajo los procedimientos que atienden a los requisitos mínimos estipulados por las principales normas o códigos de fabricación.
- El código ASME en su artículo T-510 estipula los parámetros que se deben utilizar en una inspección a un equipo térmico, al igual que la selección y el desarrollo del examen, donde se detallan los procedimientos para las partes, componentes, materiales y las determinaciones de espesores.
- El procedimiento de ensayo no destructivo por ultrasonido aplicado a la tapa posterior de la caldera para medir su espesor, se realizó según lo estipulado por el código ASME para medición de espesores a un equipo térmico, por lo que se concluye que el componente en estudio se encuentra en óptimas condiciones para continuar trabajando de forma correcta, ya que

ninguno de los 12 puntos medidos de la tapa muestran espesores menores al 30% del espesor real (ver página 88).

- La aplicación correcta del END por ultrasonido arroja un resultado confiable, recomendable para ser aplicado tanto en la detección preventiva de futuras fallas, como en fallas ya existentes.

VIII. BIBLIOGRAFIA.

- Facultad de Ingeniería. Curso de ultrasonido básico. Universidad central de Venezuela, 2009.
- Sergio Lillo, Claudio Garcés. Detección de fallas mediante ensayo no destructivo de ultrasonido. Concepción, Universidad del Bío-Bío. Ingeniería de ejecución en Mecánica. 2012
- ASME BPVC V (2010), Boiler & Pressure Vessel Code, Section V, Nondestructive Examination, 2010.
- Procedimiento para la medición de espesores por el método de ultrasonido en recipientes a presión, extracto norma ASME V
- JOSEPH L, Rose. Ultrasonic Waves in Solid Media. The Pennsylvania State University, Cambridge University Press, 1999.
- Serie EPOCHTM 1000 Manual del usuario. Olympus NDT, 48 Woerd Avenue, Waltham, MA 02453, EEUU. 910-269-ES Revision A. Junio de 2009.