

INSPECCIÓN DE UNIONES SOLDADAS MEDIANTE ENSAYO NO DESTRUCTIVO  
DE ULTRASONIDO CON EL EQUIPO VEO 16-64 SONATEST

Presentado por:

DANIEL JIMÉNEZ BENÍTEZ  
DANIEL BEJARANO OSORIO

Dirigido por:

JOSÉ LUIS TRISTANCHO R., M.sc., Ph.D.

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FORMATIVA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA

2017

## 1 DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a nuestra familia en especial a nuestros padres que con su esfuerzo lograron formarnos como personas de bien con muchos valores que fueron inculcados desde el hogar donde crecimos y que nos ayudaron para salir adelante siempre buscando el mejor camino.

También a nuestros maestros que compartieron con nosotros su conocimiento no solo técnico sino que también el que deja la experiencia de la vida, que nos enseñaron a ser mejores personas y que siempre nos inculcaron honestidad y sabiduría durante todos los años de nuestra formación como profesionales.

Y a nuestros amigos que aportaron su apoyo incondicional cuando más lo necesitábamos y que compartieron con nosotros mucho tiempo de estudio.

## 2 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al ingeniero José Luis Trisancho r., m.sc., Ph.D., por transmitirnos su conocimiento y hacer posible la ejecución de este proyecto.

Daniel Jiménez Benítez

Gracias a mis padres por formarme como una persona íntegra y hacerme entender que los sueños se logran con esfuerzo y dedicación, a mi madre por aconsejarme a cada momento, por creer en mí y por apoyarme durante toda mi formación profesional.

A mi padre por el apoyo incondicional que me brindo durante todos estos años de estudio y por los consejos que me hicieron crecer como persona.

Daniel Bejarano Osorio

Gracias a mis padres por el apoyo que me brindaron durante este proceso de formación profesional y nunca dudaron de mis capacidades, gracias a mis maestros que me formaron no solo como profesional sino también como persona con ética y moral.

### 3 TABLA DE CONTENIDO

1	DEDICATORIA.....	2
2	AGRADECIMIENTOS.....	3
4	INTRODUCCIÓN.....	6
5	RESUMEN.....	7
6	OBJETIVOS.....	8
6.1	OBJETIVO GENERAL.....	8
6.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
7	MARCO TEÓRICO.....	9
7.1	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END).....	9
7.2	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS MÁS COMUNES.....	9
7.2.1	INSPECCIÓN VISUAL.....	9
7.2.2	TINTAS PENETRANTES.....	10
7.2.3	RADIOGRAFÍA.....	10
7.2.4	TERMOGRAFÍA.....	11
7.2.5	ANÁLISIS DE VIBRACIONES.....	11
7.3	ULTRASONIDO.....	12
7.3.1	DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO.....	12
7.3.2	PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA GENERAR ULTRASONIDO.....	19
7.3.3	DETECCION DE DEFECTOS POR ULTRASONIDO.....	20
7.3.4	EQUIPO Y COMPONENTES.....	21
7.4	ULTRASONIDO PHASED ARRAY.....	25
7.4.1	DIFERENCIAS ENTRE PHASED ARRAY Y ULTRASONIDO CONVENCIONAL.....	26
7.4.2	FORMACION DEL HAZ.....	26
7.4.3	REFLEXIÓN DE LA ONDA ACÚSTICA EN MODO PHASED ARRAY.....	27
8	EQUIPO VEO 16:64 SONATEST.....	27
8.1	DESCRIPCION DEL EQUIPO.....	28
8.1.1	Teclado de control.....	28
8.1.2	Conectores.....	28
8.1.3	PANTALLA.....	29
9	NORMAS PARA LA INSPECCIO DE SOLDADURA POR ULTRASONIDO.....	30
9.1	REQUISITOS ESTIPULADOS EN CÓDIGO AWS D1.1.....	31
9.1.1	Artículo 6.22 Equipo ultrasónico:.....	31
9.1.2	Artículo 6.26.6.4 Factor de atenuación:.....	32
9.1.3	Artículo 6.26.6.5 Clasificación de indicación:.....	32

9.1.4	Artículo 6.26.8 Bases para aceptación o rechazo: .....	32
10	METODOLOGIA DEL ENSAYO.....	32
10.1	Equipo base de comparación: .....	33
10.2	PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO CONVENCIONAL	33
10.2.1	Procedimiento de calibración. ....	33
10.3	REPORTE DE INSPECCIÓN PRELIMINAR.....	34
10.4	Análisis de resultados preliminares.....	43
11	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PHASED ARRAY.....	44
11.1	Delimitación de la zona de barrido: .....	44
11.2	Calibración del equipo VEO 16:64 SONATEST: .....	44
11.3	Parámetros de configuración Phased Array: .....	44
12	INSPECCIÓN, REPORTE Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
12.1	PROBETA 1 .....	45
12.1.1	Reporte punto 1 y 2 .....	46
12.1.2	Reporte punto 3 .....	47
12.1.3	Reporte punto 4 .....	47
12.1.4	Reporte punto 5 .....	48
12.1.5	Reporte punto 6 .....	48
12.1.6	Reporte punto 7 .....	49
12.1.7	Reporte punto 8 .....	49
12.2	PROBETA 2 .....	50
12.2.1	Reporte punto 1 .....	50
12.2.2	Reporte punto 2 .....	51
12.2.3	Reporte punto 3 .....	51
12.2.4	Reporte punto 4 .....	52
12.2.5	Reporte punto 5 .....	52
12.2.6	Reporte punto 6 .....	53
12.2.7	Reporte punto 7 .....	53
12.2.8	Reporte punto 8 .....	54
13	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	55
13.1	CONCLUSIONES .....	55
13.2	RECOMENDACIONES .....	56
14	Bibliografía.....	57
15	ANEXOS .....	59

## 4 INTRODUCCIÓN

La inspección por ultrasonido es un método no destructivo que posibilita caracterizar piezas y detectar defectos presentes sin necesidad de perturbar su estructura. Por esta razón resulta importante comprender el funcionamiento y las técnicas desarrolladas para elaborar los ensayos ultrasónicos. Su funcionamiento se basa en la impedancia acústica que es el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido y la densidad del material.

Esta técnica consiste en un conjunto de ondas de alta frecuencia que son introducidas en los materiales para la detección de fallas en la superficie y subsuperficie. Las ondas de sonido viajan a través del material o medio de propagación disminuyendo paulatinamente y son reflejadas a la interface, el haz reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas y discontinuidades como grietas, laminaciones, inclusiones de escoria, poros y otras. El equipo de inspección por ultrasonido incluye el siguiente equipo básico: Un generador electrónico de señal que produce ráfagas de voltaje alternado, un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alternado son aplicadas, en la mayoría de los sistemas un transductor simple actúa como emisor y receptor, un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo, un dispositivo electrónico para amplificar y modificar las señales del transductor, un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte en pantalla.

La mayoría de las inspecciones ultrasónicas son realizadas en frecuencias entre 0.1 y 25 MHz. Las ondas de ultrasonido son vibraciones mecánicas, las amplitudes de las vibraciones producen esfuerzos en las piezas por debajo de su límite elástico, de esta manera los materiales no producirán deformaciones plásticas. La técnica de ultrasonido permite conocer muchas variables en piezas de alta complejidad geométrica, entre otras permite la inspección de espesores de tanques de almacenamiento, inspección de la pérdida de espesores en tuberías y el hallazgo de grietas en estructuras. Mediante esta técnica se pueden evitar paradas inesperadas en la producción, daños severos que perjudiquen al medio ambiente y hasta posibles pérdidas humanas. Este método contribuye en la eficiencia de los procesos disminuyendo costos y riesgos. Para la investigación se tendrá en cuenta el hallazgo de grietas o discontinuidades en uniones soldadas de distintos materiales.

## 5 RESUMEN

Este proyecto consiste en la inspección de uniones soldadas mediante el uso del equipo VEO 16-64 SONATEST de ultrasonido utilizado para ensayos no destructivos y la aplicación de la normatividad vigente para la inspección de soldadura. En base a los objetivos propuestos dentro del proyecto se decidió llevar a cabo un estudio acerca de la teoría del ultrasonido, incluyendo teoría sobre la propagación de ondas, dando inicio a las primeras mediciones con el equipo con el fin de adquirir las competencias necesarias en el manejo del equipo y en la correcta interpretación de las fallas encontradas.

Después de entender el concepto teórico se llevó a cabo la inspección mediante ultrasonido a la probeta base, con la particularidad de que esta posee fallas inducidas para determinar la fiabilidad del método utilizado.

## **6 OBJETIVOS**

### **6.1 OBJETIVO GENERAL**

Identificar y analizar los defectos y fallas que se presentan en las diferentes uniones soldadas mediante un estudio ultrasónico haciendo uso del equipo VEO 16-64 SONATEST disponible en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

### **6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar, analizar y comprender el funcionamiento del equipo de ultrasonido con el que se va a trabajar.
- Realizar la prueba de ultrasonido a las diferentes probetas (uniones soldadas).
- Analizar qué tipo de defectos o discontinuidades se presentan en las diferentes uniones soldadas mediante la técnica de ultrasonido.
- Determinar los tamaños de las discontinuidades que se encuentren en las probetas.
- Analizar los datos obtenidos y concluir qué tan severas pueden ser las discontinuidades o grietas que se presentan en uniones soldadas de diferentes materiales.



## 7 MARCO TEÓRICO

### 7.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

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

### 7.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS MÁS COMUNES

En la actualidad los END más utilizados son:

- Inspección visual
- Tintas penetrantes
- Radiografías
- Termografía
- Análisis de vibraciones
- Ultrasonido

#### 7.2.1 INSPECCIÓN VISUAL

Es el método de inspección utilizado con mayor frecuencia, ya que permite observar salpicaduras, existencia de cenizas y grietas superficiales; con este método se tiene la limitante de que únicamente se puede aplicar para detectar discontinuidades abiertas a la superficie.



*Ilustración 1: Instrumentos para inspección visual. [1]*

## 7.2.2 TINTAS PENETRANTES

Los ensayos no destructivos por tintas penetrantes son de los más sencillos debido a que no cuenta con requisitos exigentes desde el punto de vista de equipos de examen. El ensayo por tintas penetrantes permite detectar imperfecciones y defectos no perceptibles mediante la inspección visual. Este ensayo es válido para materiales como metales, cerámicos, polímeros, etc.

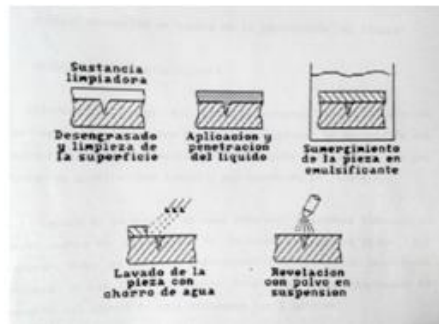


Ilustración 2: Procedimiento de inspección por tintas penetrantes. [2]

## 7.2.3 RADIOGRAFÍA

Se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades o variaciones en la estructura interna de un material; implica la utilización de radiación gamma o rayos X, los cuales son capaz de penetrar materiales sólidos con el propósito de obtener registros para el estudio y la evaluación de las discontinuidades presentes en dicho material.

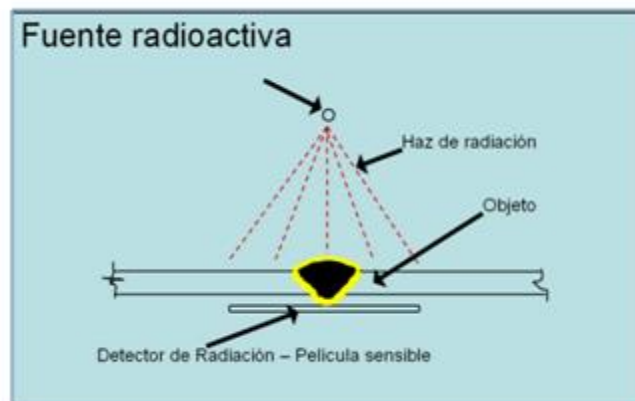


Ilustración 3: Inspección mediante radiografía [2]

#### 7.2.4 TERMOGRAFÍA

La inspección por termografía es una técnica de ensayo no destructivo sin contacto que permite determinar la temperatura de la superficie de un cuerpo a través de la captación de la radiación infrarroja que este emite. Cuando el flujo de calor en un material es alterado por la presencia de anomalías o defectos, provoca contrastes de temperatura en su superficie; el uso de este método no destructivo de inspección está basado en la obtención y en el análisis de las imágenes de dichos patrones térmicos.



*Ilustración 4: Inspección por termografía. [3]*

#### 7.2.5 ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Es una técnica de inspección utilizada para el diagnóstico de fallas y la evaluación de la integridad de equipos rotativos, la cual consiste en el estudio de la propagación de ondas elásticas en un material homogéneo y la determinación de los efectos producidos verificables con la norma vigente, lo cual conlleva a tener una trazabilidad del equipo y adelantarse a las posibles fallas tales como desalineación, daños en rodamientos, desbalanceo, etc.



*Ilustración 5: Inspección por análisis de vibraciones. [4]*

## 7.3 ULTRASONIDO

El método de inspección por ultrasonido se basa en la medición de la propagación del sonido en el material a analizar; su funcionamiento se basa en la impedancia acústica, que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima del sonido y la densidad del material. Los equipos de ultrasonido que se utilizan actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, sub-superficiales e internas, dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias seleccionadas que están dentro de un rango que va desde 0.2 MHz hasta 25 MHz



*Ilustración 6: Equipo de inspección por ultrasonido [5]*

### 7.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO

#### 7.3.1.1 Conceptos básicos

Con la finalidad de comprender mejor la técnica de ultrasonido se explicaran los principios básicos de la física de la propagación de ondas y la acústica, tales como:

**Onda:** Es la propagación de una oscilación provocada por la vibración de las moléculas que constituyen un material.

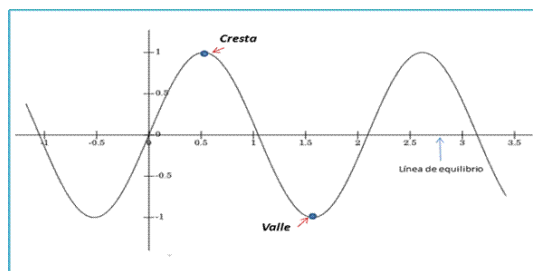


Ilustración 7: ondas. [7]

**Oscilación:** Es el cambio periódico de la condición o el comportamiento de una cuerpo.

**Periodo (T):** Es el tiempo empleado para llevar a cabo un ciclo completo.

**Frecuencia (f):** Es la inversa del periodo y representa el número de ciclos efectuados en un segundo.

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

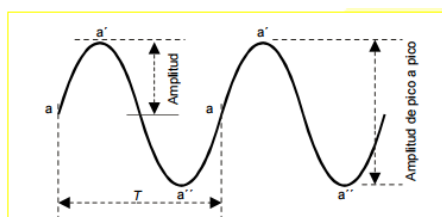


Ilustración 8: frecuencia de una onda. [6]

**Amplitud (A):** Es la máxima desviación de oscilación, si esta es constante en el tiempo la oscilación se considera sin amortiguamiento (para materiales perfectamente elásticos), en cambio si esta decrece con el tiempo, la oscilación se considera como amortiguada en este caso la disminución de dicha amplitud se debe a la disipación de energía (materiales que no son perfectamente elásticos).

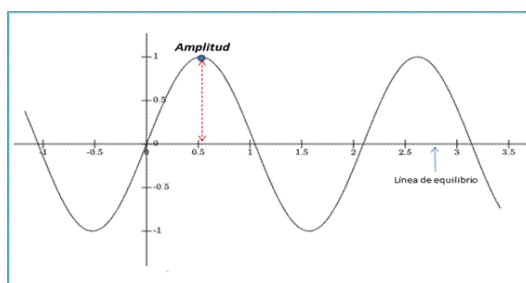


Ilustración 9: Amplitud. [7]

**Amortiguación:** Es la disminución de la amplitud de una onda con el tiempo.

**Velocidad de propagación:** Es la velocidad a la que se propagan las ondas sonoras a través de un medio, esta depende de las propiedades del material o del medio en el que se desplaza la onda.

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

A continuación se presenta una tabla con los valores de la velocidad de propagación del sonido en diferentes medios:

Aire a 0°C	331 m/s
Aire a 20°C	343 m/s
Agua	1290 m/s
Madera	1000-5000 m/s
Cemento	4000 m/s
Acero	4700-5000 m/s
Vidrio	5000-6000 m/s
Goma	40-150 m/s

Tabla 1: Velocidades de propagación del sonido. [6]

**Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Es la distancia que recorre una onda en el tiempo de un periodo. Depende de la velocidad de propagación y de la frecuencia.

Por lo tanto si la onda se propaga con una velocidad  $V$ , se tiene:

$$\lambda = V \cdot T$$

O en función de la frecuencia:

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

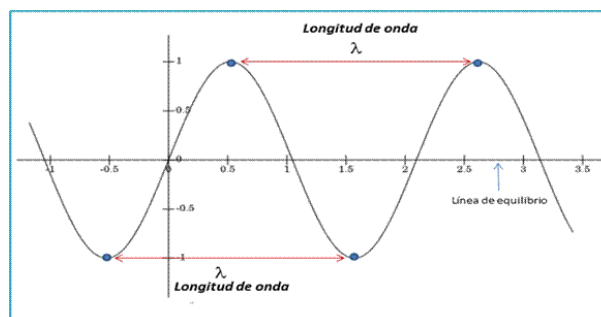
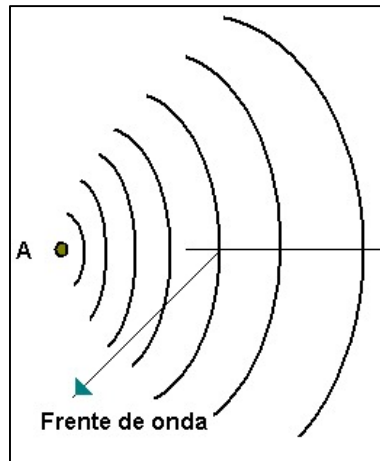


Ilustración 10: Longitud de onda. [7]

**Frente de onda:** Es el lugar geométrico en que los puntos del medio de propagación son alcanzados en un mismo instante por una determinada onda ya sea que una onda este propagándose por el espacio o sobre una superficie, pueden visualizarse como líneas que se desplazan a través del tiempo alejándose de la fuente sin tocarse.



*Ilustración 11: Frente de onda. [7]*

### 7.3.1.2 Tipos de onda:

La propagación del sonido se da en forma de ondas, transporta energía de un punto del espacio a otro pero requieren de un medio para dicha propagación. Existen distintos tipos de ondas, se clasifican de acuerdo a los siguientes criterios:

#### Según su propagación [8]:

- Ondas unidimensionales: Estas ondas, como su nombre indica, viajan en una única dirección espacial. Es por esto que sus frentes son planos y paralelos.
- Ondas bidimensionales: estas ondas, en cambio, viajan en dos direcciones cualquiera de una determinada superficie.
- Ondas tridimensionales: estas ondas viajan en tres direcciones conformando un frente de esférico que emanan de la fuente de perturbación desplazándose en todas las direcciones.

Según su dirección [8]:

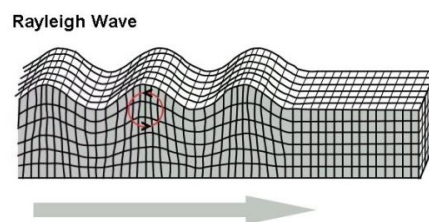
- Ondas transversales: las partículas por las que se transporta la onda se desplazan de manera perpendicular a la dirección en que la onda se propaga.
- Ondas longitudinales: en este caso, las moléculas se desplazan paralelamente a la dirección en la que la onda viaja.

Según el medio en que se propagan [8]:

- Ondas electromagnéticas: estas ondas no necesitan de un medio para propagarse en el espacio, lo que les permite hacerlo en el vacío a velocidad constante, ya que son producto de oscilaciones de un campo eléctrico que se relaciona con uno magnético asociado.
- Ondas mecánicas: a diferencia de las anteriores, necesitan un medio material, ya sea elástico o deformable para poder propagarse. Este puede ser sólido, líquido o gaseoso.
- Ondas gravitacionales: estas ondas son perturbaciones que afectan la geometría espacio-temporal que viajan a través del vacío. Su velocidad es equivalente a la de la luz.

Además de los tipos de onda vistos anteriormente también tenemos:

- Ondas de superficie o Rayleigh [8]: son un tipo especial de ondas transversales que se transmiten a lo largo de la superficie de un material. Se propagan sobre la superficie de materiales normalmente de espesores gruesos con una penetración equivalente a una longitud de onda. El movimiento de las partículas forma una elipse siendo esta una combinación de ondas transversales y longitudinales donde el eje de mayor longitud es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Estas ondas son utilizadas en el método de ultrasonido porque son particularmente sensibles a defectos en la superficie siendo capaz de copiar las posibles curvas que dichas superficies posean.



*Ilustración 12: Ondas de Rayleigh. [9]*



- Ondas LAMB [10]: Este tipo de ondas aparecen en cuerpos planos de espesor delgado como las placas. Estas se propagan paralelas a la superficie a través de todo el material, solo se generan para determinadas condiciones del ángulo de incidencia, frecuencia y espesor de la placa.

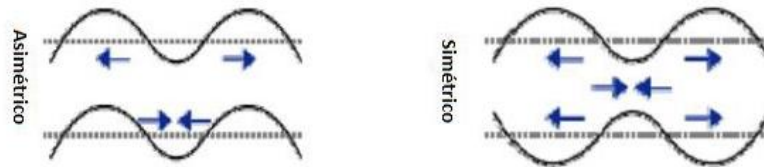


Ilustración 13: ondas LAMB. [9]

- Ondas de torsión: Este tipo de ondas se propagan en cuerpos con forma de barras, estas ondas son rotacionales alrededor del eje longitudinal de la barra y la dirección de propagación se sitúa en la dirección del eje de la barra.

### 7.3.1.3 Descomposición de ondas

Las ondas sonoras dentro de un medio pueden sufrir las siguientes descomposiciones:

**Reflexión:** Al incidir una onda sobre una superficie de propiedades elásticas distintas al medio en que se propaga, parte de su energía es reflejada por esa superficie en la dirección que forma, con la normal a la superficie el mismo ángulo que la onda incidente.

**Refracción:** La energía de la onda que no fue reflejada penetra en el segundo medio con dirección distinta al de la onda incidente, pero tal que la relación entre los senos de los ángulos respecto a la normal sea constante.

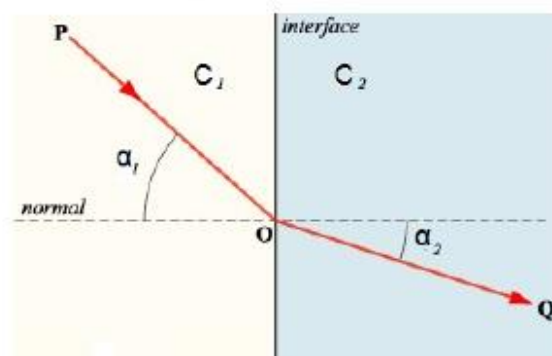


Ilustración 14: refracción de onda

La ley de Snell relaciona el ángulo de la onda incidente con el de la onda refractada directamente con las velocidades del sonido en ambos medios.

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad \text{Donde:}$$

$\alpha_1$ : Ángulo de incidencia de la onda incidente.

$\alpha_2$ : Ángulo de incidencia de la onda refractada.

$C_1$ : Velocidad del sonido en el medio de la onda incidente.

$C_2$ : Velocidad del sonido en el medio de la onda refractada.

**Difracción:** Es el fenómeno por el cual una onda que incide en un cuerpo pequeño o una abertura se distorsiona y se propaga en todas las direcciones detrás de dicho orificio.

#### 7.3.1.4 Ondas Sonoras

**Impedancia Acústica (Z):** la impedancia acústica es la resistencia que ofrece un medio a que las ondas se propaguen a través de él, siendo igual al producto de la densidad del medio por la velocidad de propagación de la onda en dicho medio.

$$Z = \rho * C$$

$\rho$ : Densidad del material.

C: Velocidad de propagación en el medio.

**Frecuencias:** las ondas ultrasónicas son provocadas a partir de una frecuencia determinada y no son audibles al oído humano. Los rangos de frecuencia para distintos tipos de ondas son los siguientes:

- Subsónico:  $f < 16$  Hz, en este rango no se escucha ningún tono, solo es perceptible la presión.
- Sónico:  $16 \text{ Hz} \leq f \leq 20 \text{ kHz}$ , rango audible por el ser humano.
- Ultrasónico:  $f > 20 \text{ kHz}$ .

Las frecuencias utilizadas en los ensayos de ultrasonido van desde los 0.5 a 25 MHz.

### 7.3.2 PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA GENERAR ULTRASONIDO

Cuando se busca emplear la técnica de ultrasonido en ensayos no destructivos es necesario emplear una serie de mecanismos y equipos ya definidos para obtener los resultados deseados. El concepto básico es la transformación de pulsos eléctricos en vibraciones mecánicas y el retorno de vibraciones mecánicas a energía eléctrica. Para ello se utilizan unos palpadores que generan y reciben señales ultrasónicas. Esta conversión de energía se puede realizar mediante dos fenómenos físicos que son:

- **Efecto piezoeléctrico:** el efecto piezoeléctrico es comúnmente utilizado para ensayos no destructivos de los materiales. Podemos definir un material piezoeléctrico como todo aquel capaz de convertir deformaciones mecánicas procedentes de una presión externa en cargas eléctricas; los elementos utilizados son una pieza de material polarizado, en una parte las moléculas están cargadas positivamente y en la otra parte negativamente. La pieza del material piezoeléctrico va conectado a un electrodo en cada una de sus caras opuestas, así cuando se aplica un campo eléctrico a lo largo del material las moléculas polarizadas se alinean con el campo formando un dipolo inducido en la estructura cristalina. Esta alineación de las moléculas causará un cambio dimensional llamado electrostricción. A su vez puede ocurrir el efecto contrario, que se provoque un campo eléctrico tras una modificación dimensional.

Generalmente el espesor del elemento activo utilizado es determinado por la frecuencia en la que se utiliza el transductor, cuanto más alta son las frecuencias requeridas, más delgados serán los cristales utilizados.

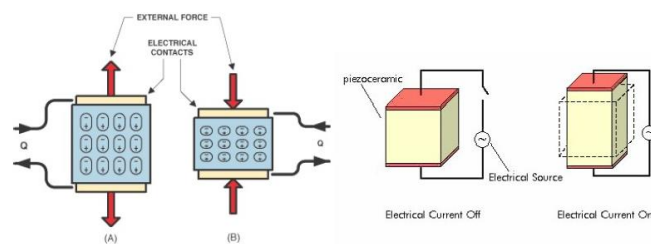
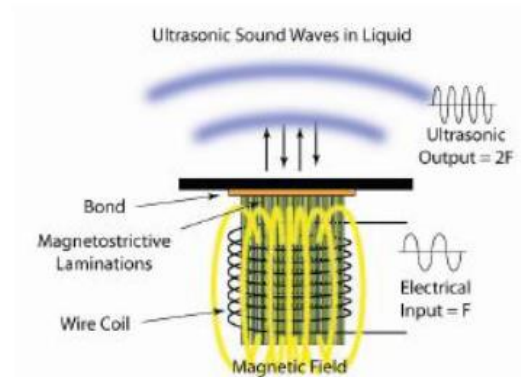
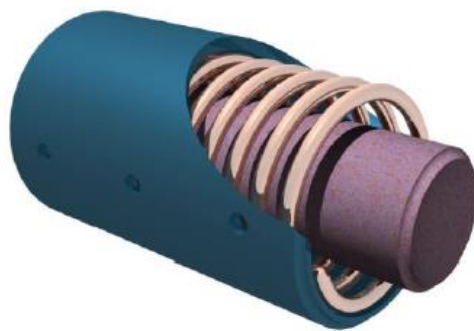


Ilustración 15: Efecto Piezoeléctrico

- **Efecto magnetostrictivo:** El efecto magnetostrictivo consiste en aprovechar la propiedad que tienen algunos materiales ferromagnéticos; principalmente se utiliza Níquel y Acero, que se caracterizan por contraerse o expandirse en determinada dirección cuando están sometidos a la influencia de campos magnéticos en condiciones

especiales. Este efecto es recíproco, lo cual permite a su vez emisión y recepción de las ondas ultrasónicas. Estos materiales están compuestos por un gran número de moléculas que deben ser polarizadas y se deformarán mecánicamente cuando se les aplique un voltaje. A medida que se les aplica una diferencia de potencial, las moléculas pasarán de estar orientadas aleatoriamente, a obtener una orientación según el campo aplicado, la carga aplicada es alterna y volverá a cero, aumentando y disminuyendo así su tamaño y produciendo con ello las vibraciones.



*Ilustración 16: Mecanismo magnetoestrictivo*

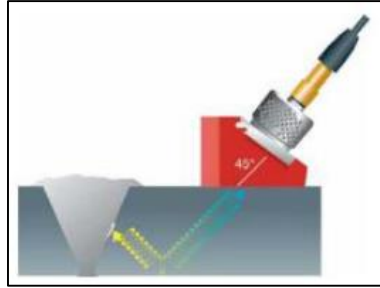
Entre los materiales más conocidos en la utilización de cristales para los transductores se encuentran los siguientes:

- Cuarzo: Fue el primer material utilizado, es transparente y de dureza alta, tiene características muy estables en frecuencia, sin embargo es pobre en la generación de energía acústica.
- Cerámicas sintéticas: Son generadores de energía acústica de alta eficiencia, sin embargo tienen tendencia al desgaste.
- Sulfato de litio: Es muy eficiente como receptor de energía acústica, pero su fragilidad es alta; soluble en agua y su uso es limitado debido a que solo puede trabajar con temperaturas menores de 75° C.

### **7.3.3 DETECCIÓN DE DEFECTOS POR ULTRASONIDO**

El ensayo no destructivo por ultrasonido es utilizado para detectar fallas y discontinuidades en un material, este ensayo consiste en introducir un conjunto de ondas de alta frecuencia a dicho material, estas ondas se propagan a través del material y cuando estas se encuentran con un medio de propagación distinto una parte de estas es reflejada; el grado de reflexión depende en

gran parte del estado físico de los materiales que forman la interface, es decir que si el haz ultrasónico pasa de un medio solido a uno gaseoso la reflexión de este será prácticamente total facilitando la detección de grietas, laminaciones, poros, socavados y otras discontinuidades; en el caso de que la onda pase de un medio solido a otro en el mismo estado la reflexión de esta será parcial generando una respuesta de menor energía pero de igual manera detectable.



*Ilustración 17: Detección de defectos por ultrasonido.*

#### **7.3.4 EQUIPO Y COMPONENTES**

Existen diversos equipos de generación de ultrasonido, la elección del uso de alguno de estos depende de las características del material y de las propiedades a medir al igual que el rendimiento que se desea obtener durante la medición.

Para la generación de ultrasonido se requiere de unos elementos básicos que hagan posible los procesos mecánicos, así que el equipo completo se compone de:

- Un generador electrónico de señales que produce pulsos eléctricos de corta duración.
- Un palpador (transductor) que emite el haz de ondas ultrasónicas cuando recibe los pulsos eléctricos y convierte las ondas de ultrasonido de la pieza de prueba a pulsos eléctricos.
- Un acoplante que transfiere las ondas del haz ultrasónico a la pieza de prueba y elimina el oxígeno que se encuentre entre el palpador y la probeta.
- Un dispositivo electrónico para amplificar y si es necesario, desmodular o de otra manera modificar las señales del transductor.
- Un dispositivo de despliegue para indicar las características o marcas de salida de la pieza de prueba, el dispositivo puede ser un tubo de rayos catódicos (TRC), pantalla electroluminiscente o de cuarzo líquido.
- Un reloj electrónico o contador para controlar la operación de los componentes del sistema, para servir como punto de referencia primario, y para proporcionar coordinación del sistema completo.

#### 7.3.4.1 TRANSDUCTOR

Es la parte más importante del instrumento de ultrasonido, en este se da la transformación de energía eléctrica a mecánica y viceversa, existen diferentes tipos de transductores los cuales según su construcción obtendrán un comportamiento diferente. La elección de uno u otro depende de la frecuencia y ancho de banda utilizados así como de la estructura a analizar. El haz ultrasónico generado por un transductor en forma de disco, es similar a un haz de luz, el cual es propagado en forma de cono. Generalmente este haz se considera constante en toda su longitud, pero al medir las intensidades a lo largo de éste podemos distinguir tres zonas.

- **Zona muerta:** En esta zona se hace muy difícil encontrar discontinuidades o defectos en el material, esto se debe a las interferencias producidas por las vibraciones del cristal ya que las ondas de ultrasonido se generan desde numerosos puntos en el plano del elemento piezoeléctrico. Debido a la zona muerta se produce el primer pico en el escáner de la probeta, con el fin de eliminar esta zona se utilizan elementos separadores en los transductores que aleja la fuente de ultrasonido de la superficie de la pieza eliminando dicha zona.
- **Zona de campo cercano:** También conocida como zona de Fresnel, en esta zona están las variaciones que presenta el haz ultrasónico debido a los máximos y mínimos que se dan por la presión acústica. Se detectan indicaciones múltiples y con grandes variaciones es por ello que el efecto producido por un haz ultrasónico en esta zona es ignorado o desconocido. Es una zona de fluctuaciones de la intensidad producidas por efectos de los bordes del cristal. Las ondas de presión se convierten en uniformes hacia el final del campo cercano, la distancia del campo cercano está relacionada con el diámetro del transductor y con la longitud de onda del haz ultrasónico
- **Zona de campo lejano:** también conocida como zona de Fraunhofer, en esta zona, la intensidad o presión acústica se estabiliza, teniendo mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz, y va disminuyendo hacia los límites del mismo. El ángulo de divergencia depende de varios factores como son el diámetro y frecuencia del palpador así como de la velocidad acústica del medio transmisor.

#### Tipos de transductores

- **Transductor de haz angular:** Utilizan una interface en forma de cuña la cual genera un ángulo entre el haz emitido y la normal a la superficie analizada. Esto introduce ondas refractadas de corte en el material al mismo tiempo que dichas ondas son reflejadas en las

paredes de la pieza mejorando la detección de imperfecciones. También son utilizados para generar ondas de superficie que permiten encontrar defectos superficiales o subsuperficiales. Pueden ser adquiridos con diferentes ángulos, fijos o en versiones ajustables, hay que prestar especial atención con los que poseen ángulos fijos debido a que el ángulo de refracción de la onda cambiará según el material utilizado. Pueden ser de dos tipos: como una unidad integral o desmontable (transductor de haz recto y zapata).

- **Transductor de contacto:** Los transductores de contacto son los transductores comunes de  $0^\circ$  y resultan idóneos para inspeccionar materiales grandes de geometría sencilla, el transductor de contacto se sitúa verticalmente sobre la superficie para detectar fallas en el material sometido a la inspección, utilizando un medio de acople para que puedan ser transmitidas las ondas ultrasónicas. Este consta de un elemento de cristal sencillo alojado dentro de una carcasa, el mismo cristal transmite y recibe la energía sonora. Estos transductores generan un retardo de tiempo entre la generación de la onda de sonido y la llegada de la onda reflejada mejorando la lectura en las zonas cercanas a la superficie del material. Esto los hace especiales para el uso en medición de espesores con gran precisión y verificación de laminación en materiales compuestos. Los transductores se seleccionan por frecuencia y tamaño del cristal, la frecuencia del transductor adecuado se determina por el tipo de material y por la gama de espesores esperada. Las opciones de tamaño del cristal y de ángulo de la cuña se determinan por el acceso, la forma y el acabado de la superficie del objeto sometido a medición.
- **Transductor de inmersión:** La transmisión del ultrasonido desde el transductor a la pieza que se encuentra en modo de prueba se realiza a través de una columna de líquido, es decir, sin que exista contacto directo, presión no rozamiento entre el transductor y la pieza. Se puede adquirir con un haz plano o un foco cilíndrico dependiendo de la utilidad o la ventaja que poseen los cabezales con focos que mejoran la sensibilidad y la resolución axial al concentrar la energía del sonido en una pequeña área. Estos transductores se utilizan especialmente cuando se requiere analizar probetas de gran volumen, examinar lotes de gran número de muestras o de formas complejas. Se permite emplear frecuencias más altas, cristales con espesores más finos que las utilizadas con palpadores de contacto directo.
- **Transductor normal de un solo cristal:** Este tipo de transductor contiene un solo cristal piezoeléctrico que realiza las funciones de emisor y receptor, sus características son

similares a los transductores de contacto mencionados anteriormente. También podemos encontrar transductores tipo dual o de doble cristal.

### **Partes del transductor**

El transductor consta de varias partes que hacen posible la emisión y recepción de las ondas ultrasónicas. El transductor se compone de:

- **Material piezoeléctrico:** Es el elemento activo, el cristal, este puede ser de diferentes tipos según el tipo de análisis que se vaya a realizar. Para obtener la mayor energía de salida posible se coloca una lámina de  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda con una impedancia determinada entre la cara del cabezal y el cristal piezoeléctrico. Esta lámina genera que todas las ondas que salen del cabezal lo hagan en fase. Los cabezales de contacto incluyen una lámina que protege los elementos internos de ralladuras.
- **Electrodos:** Conductor eléctrico a través del cual puede entrar o salir una corriente eléctrica en contacto con el material piezoeléctrico.
- **Material de apoyo de amortiguación:** Este material tiene gran influencia en el amortiguamiento del transductor, debe tener una impedancia similar a la del material piezoeléctrico para producir un amortiguamiento lo más eficiente posible, por lo que el cabezal tendrá un ancho de banda de trabajo más amplio y una mejor sensibilidad. Cuando la diferencia de impedancia entre ambos materiales aumenta, la penetración aumenta pero la sensibilidad disminuye. Los cabezales están contruidos para soportar cierto maltrato, pero se recomienda manipularlos con cuidado ya que un mal uso como golpes pueden quebrar la lámina de protección o el material de apoyo, y ante cualquier daño de estos dos últimos elementos se puede presentar una lectura errónea en el análisis de ultrasonido.

### **7.3.4.2 ACOPLANTES**

Cuando la inspección es por contacto directo se requiere del uso de acoplantes especiales necesarios para transmitir las ondas ultrasónicas desde el transductor a las superficies del material en estudio, además de eliminar el oxígeno entre la pieza y el transductor.

Todos los acoplantes deben cumplir una serie de requisitos, como son:

- Proporcionar un acoplamiento acústico positivo para una prueba confiable.
- Lubricar la superficie de la pieza y la cara del transductor, excluyendo el aire entre ellas.
- Que pueda ser fácilmente aplicado.



#### **7.4 ULTRASONIDO PHASED ARRAY**

El phased array es una técnica de inspección por ultrasonido computarizada de última generación que deja registro y tiene alta probabilidad de detección, alta precisión en la evaluación de defectos y repetitividad garantizada. Los principios físicos de funcionamiento son similares ultrasonido convencional pulso-eco, con la diferencia que se pueden controlar parámetros mediante software como: Angulo de refracción, punto de salida del haz, enfoque en una zona determinada, entre otros.

En el sentido más básico un arreglo de fases (phased array) utiliza los principios físicos de la onda de corte o presión, de tal manera que una serie de pulsos ultrasónicos genera un frente de onda lineal o sectorial, excitando los elementos a diferente tiempo (delay), dichos pulsos ultrasónicos se reflejaran si encuentran un punto o área diferente al material base y serán captados por los elementos en su tiempo de entrada. La técnica phased array sustituye al tradicional examen de radiografía; en los últimos años diferentes códigos de diseño y construcción como ANSI, ASME B31.1, ASME I y VIII, la AWS, API han sido revisados o han emitido casos al código (code cases) permitiendo sustituir el examen radiográfico por el examen de ultrasonido con registro.

##### **Ventajas del ensayo no destructivo por ultrasonido phased array**

El método de ultrasonido mediante la técnica de phased array ofrece significativas ventajas respecto a las técnicas de radiografía y ultrasonidos convencionales, entre las que se pueden destacar:

- Velocidad, debido a la capacidad de exploración (lineal, sectorial), aumenta la velocidad del examen y permite un barrido electrónico sin necesidad de mover el palpador de manera ascendente y descendente.
- Registro, ya que permite registrar la inspección en el modo más adecuado para su interpretación y evaluación (S-scan), B-scan, C-scan y otras imágenes 2D y 3D.
- Flexibilidad, ya que realiza una gran variedad de tipos de exploración para la detección de diferentes tipos de defectos o discontinuidades localizados en distintas configuraciones y componentes, me permite una inspección simultánea con múltiples ángulos usando un solo transductor; además me permite controlar las características del haz ultrasónico a través de la configuración de las leyes focales.

- Archivo, ya que me permite generar un registro de la inspección en diferentes formatos obteniendo el 100% de los datos adquiridos de las señales, pudiendo realizar nuevas evaluaciones en el momento que se requiera.

#### 7.4.1 DIFERENCIAS ENTRE PHASED ARRAY Y ULTRASONIDO CONVENCIONAL

##### PHASED ARRAY

- Utiliza varios elementos piezoeléctricos.
- Usa múltiples ángulos de inspección con una sola zapata.
- Se detectan discontinuidades con barridos electrónicos.

##### ULTRASONIDO CONVENCIONAL

- Utiliza un solo elemento piezoeléctrico.
- Cada ángulo de inspección requiere una zapata con el ángulo deseado.
- La detección de una discontinuidad se basa en la orientación y manipulación del transductor con la habilidad del especialista.

#### 7.4.2 FORMACION DEL HAZ

Si se varía el tiempo de retardo de cada elemento piezoeléctrico se pueden obtener diferentes formas del haz ultrasónico utilizando un mismo transductor.

Dentro del método de ultrasonido phased array tenemos diferentes modos de barridos electrónicos como lo son el barrido sectorial que permite un barrido por rango de ángulos que van desde los 30° hasta los 70° y un barrido lineal que permite un barrido electrónico en una banda de ángulos deseados.

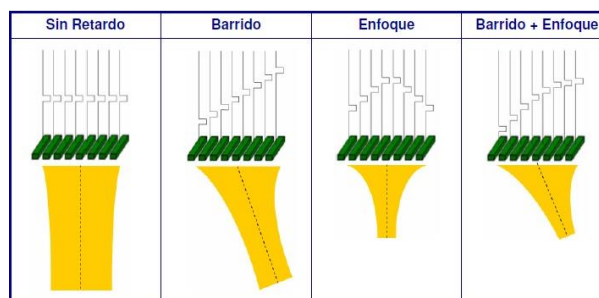


Ilustración 18: Tipos de haz en ultrasonido phased array.

### 7.4.3 REFLEXIÓN DE LA ONDA ACÚSTICA EN MODO PHASED ARRAY

La reflexión de la onda acústica en el modo phased array corresponde a las proyecciones del haz, estas salen desde el palpador y continúan hasta reflejarse, ya sea con el fondo del material a inspeccionar o con alguna discontinuidad ubicada dentro del volumen del material.

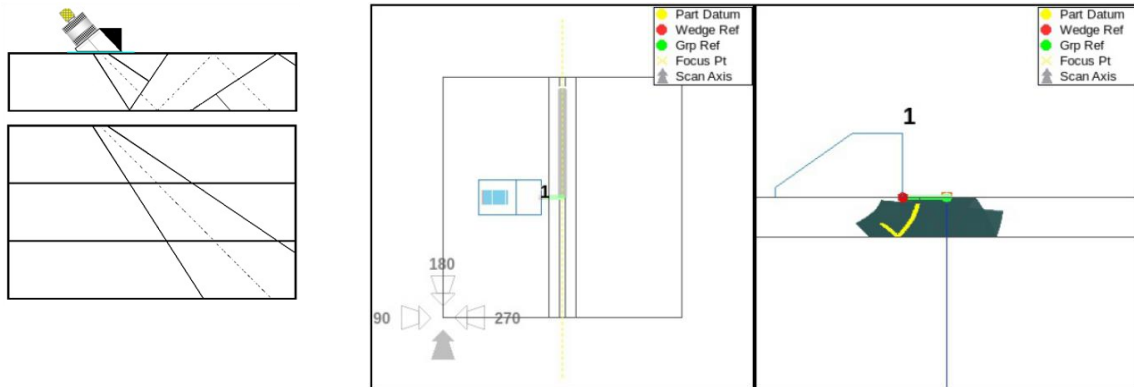


Ilustración 19: Proyección del haz en modo phased array. [11]

## 8 EQUIPO VEO 16:64 SONATEST

El equipo VEO 16:64 SONATEST es un detector de defectos por ultrasonidos con la capacidad de detección de os ultrasonidos convencionales con el modo de representación phased array. Este equipo cuenta con avanzadas herramientas de software que facilitan la detección y clasificación de fallas y discontinuidades según las principales normas vigentes. Este equipo también se caracteriza por ser portátil y resistente, lo que facilita su uso en distintos lugares y al descubierto, ya que posee resistencia al polvo, golpes y la lluvia.



Ilustración 20: Equipo VEO 16:64 SONATEST. [11].

## 8.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO

### 8.1.1 Teclado de control

El equipo VEO 16:64 SONATEST cuenta con un panel de control que posee todos los botones necesarios para la operación de este, en la ilustración 21 se puede observar un esquema que detalla la ubicación del teclado para el control del equipo.

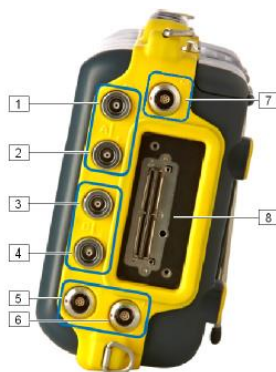


1. Rueda de mando.
2. Teclas de control principal.
3. Teclado alfanumérico y atajos.
4. Modos de grabación y adquisición de datos.
5. Archivos. Configuración, reporte, captura de pantalla.

Ilustración 21: Teclado de control. [11].

### 8.1.2 Conectores

El equipo VEO 16:64 SONATEST cuenta con distintos tipos de conectores con la finalidad de asegurar la capacidad de comunicación con otros dispositivos, como computadoras y codificadores de señal para el uso de los C-Scan.



1. Conector emisor/receptor, canal A.
2. Conector receptor, canal A.
3. Conector emisor/receptor, canal B.
4. Conector receptor, canal B.
5. Conector del codificador del eje de exploración.
6. Conector del codificador del eje índice.
7. Periférico de entrada/salida.
8. Conector phased array.

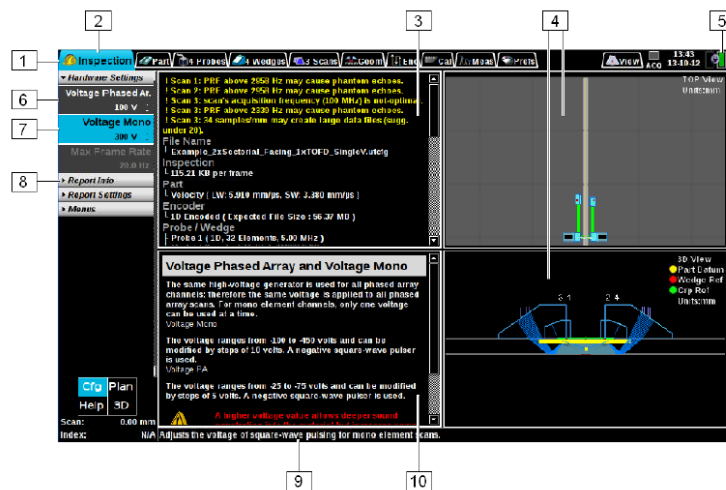
Ilustración 22: Conectores lateral derecho del equipo. [11]



Ilustración 23: Conectores lateral izquierdo del equipo. [11]

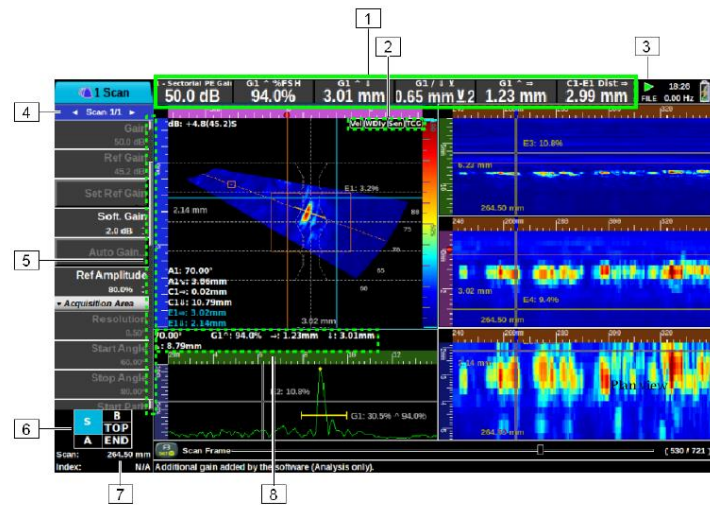
### 8.1.3 PANTALLA

El equipo VEO 16:64 SONATEST cuenta con una interfaz en donde el usuario obtiene información acerca de la configuración del equipo y los parámetros con los que se llevan a cabo la inspección.



1. Barra de pestañas.
2. Barra de menú.
3. Vista de resumen.
4. Vista 3D.
5. Estado de la batería.
6. Ítems del menú.
7. Selección de ítems.
8. Categorías.
9. Barra de información.
10. Ventana de ayuda.

Interface en modo PLAY:



- |                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1. Barra de mediciones.        | 5. Barra de desplazamiento.  |
| 2. Indicadores de calibración. | 6. Diseño de vista.          |
| 3. Estado del instrumento.     | 7. Posición del codificador. |
| 4. Selección de ítem.          | 8. Vista de medidas.         |

## 9 NORMAS PARA LA INSPECCIO DE SOLDADURA POR ULTRASONIDO

La inspección por ultrasonido está regida por normas de distintas entidades de estandarización a nivel internacional, cada una de estas define sus distintos protocolos de inspección y evaluación de discontinuidades según las exigencias y características del campo de aplicación que se pretenda abordar; algunos de los códigos ampliamente utilizados son:

- ANSI / ASME Boiler and Pressure Vessel Code (Código para Recipientes a Presión y Calderas de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).
- ANSI / AWS D1.1 Structural Welding Code (Código de Soldaduras Estructurales de la Sociedad Americana de Soldadura).
- ANSI / ASME B31 Piping Code (Código de tuberías de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).
- ANSI / API 570 Piping Inspection Code (Código para Inspección de Tuberías del Instituto Americano del Petróleo)

Para las inspecciones realizadas para este proyecto, se tomó como referencia los requisitos estipulados en la norma ANSI/ AWS D1.1 (sección 6 parte F. Regula la inspección por ultrasonido de soldaduras de ranura); teniendo en cuenta la capacidad del equipo VEO 16:64 SONATEST de realizar inspecciones mediante phased array.

## **9.1 REQUISITOS ESTIPULADOS EN CÓDIGO AWS D1.1.**

En esta norma están consignadas una serie de exigencias que se deben tener en cuenta para poder aplicar este código en la inspección y evaluación de soldaduras. Los requisitos aquí mencionados tienen en cuenta desde los estándares de inspección hasta la calificación de los inspectores, sin embargo, para este proyecto solo se tuvo en cuenta algunos de los artículos consignados en la sección 6 (Inspección); a continuación se resumen los requisitos y cálculos tenidos en cuenta para este proyecto:

### **9.1.1 Artículo 6.22 Equipo ultrasónico:**

- **6.22.1 Requisitos del equipo:** El instrumento debe ser del tipo pulso-eco, adecuado para operar con transductores que oscilan a frecuencias entre 1 y 6 MHz.
- **6.22.2 Linealidad horizontal:** La linealidad horizontal debe ser calificada sobre la distancia total de la trayectoria acústica.
- **6.22.3 Requisitos para los instrumentos de inspección:** Los equipos deben contar con estabilización interna para que al calentarse no ocurra una variación de la respuesta mayor a  $\pm 1$ dB.
- **6.22.4 Calibración de los instrumentos de inspección:** El instrumento debe contar con ganancia ajustable en pasos de 1 o 2 dB, dentro de un intervalo de al menos 60 dB.
- **6.22.5 Rango de pantalla:** El rango de amplitud de la pantalla debe ser tal que se detecten diferencias de 1 dB.
- **6.22.7 Palpadores de Haz angular:** Los palpadores de Haz angular deben consistir de un transductor y una zapata angular.
- **6.22.7.7 Bloque IIW:** El proceso de calibración debe llevarse a cabo usando un bloque de referencia IIW.

### 9.1.2 Artículo 6.26.6.4 Factor de atenuación:

El factor de atenuación “c” en el reporte de prueba, deberá ser alcanzado al sustraer 1 pulgada (25 mm) de la distancia de la trayectoria del sonido y multiplicando el resto por 0.08 (para unidades del SI). Este factor de deberá redondear al valor de dB más cercano. Los valores fraccionales menores de  $1/2$  dB se deberán reducir al nivel más bajo de dB y aquellos de  $1/2$  dB mayores aumentados al nivel más alto.

### 9.1.3 Artículo 6.26.6.5 Clasificación de indicación:

La clasificación de indicación “d” representa la diferencia algebraica en decibeles entre el nivel de indicación y el nivel de referencia con corrección por atenuación como se indica en las siguientes expresiones:

- Instrumentos con ganancia en dB.  $a - b - c = d$
- Instrumentos con atenuación en dB.  $b - a - c = d$

Donde:

a: Nivel de indicación de la discontinuidad [dB].

b: Nivel de indicación de referencia [dB].

c: Factor de atenuación: (trayectoria acústica – 25 mm)\*0.08 [dB].

d: Clasificación de la indicación [dB].

### 9.1.4 Artículo 6.26.8 Bases para aceptación o rechazo:

Cada discontinuidad de soldadura deberá ser aceptada o rechazada en base a su clasificación de indicación en conformidad con la tabla 6.2 (Anexo 1) (para estructuras cargadas estáticamente).

## 10 METODOLOGIA DEL ENSAYO

Para este proyecto se utilizó el método de comparación; inicialmente se hizo un análisis preliminar a las probetas seleccionadas con un equipo de ultrasonido convencional y por medio del cual se logró identificar las fallas y la localización de estas en las probetas. A partir de ahí, se hizo un análisis con el equipo VEO 16:64 SONATEST con el fin de observar las fallas ya clasificadas y poder determinar cómo se ve cada una de estas en el modo de análisis por phased array.

A continuación se muestra una breve descripción del equipo de ultrasonido convencional utilizado para el ensayo:



### 10.1 Equipo base de comparación:

Para realizar la caracterización de los distintos defectos encontrados en las probetas utilizadas en este proyecto, se utilizó un equipo de ultrasonido marca Olympus serie Epoch XT, al igual que un palpador angular de 70° y frecuencia de 5 MHz; para el procedimiento de calibración inicial y de la sensibilidad, se utilizó un bloque de calibración V2.



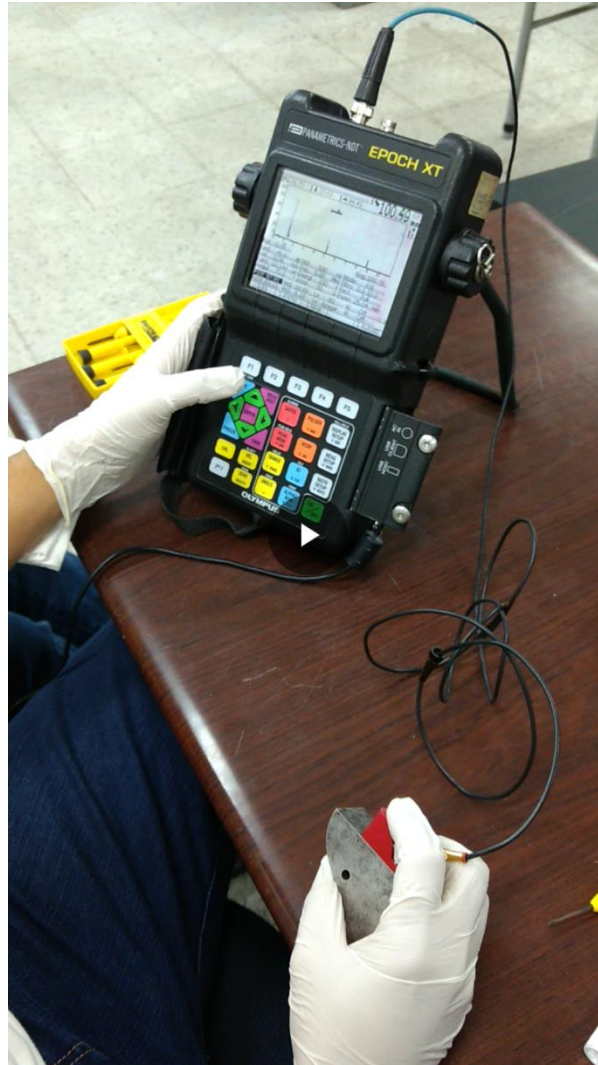
*Ilustración 24: Equipo UT convencional utilizado para la comparación. Fuente propia.*

## 10.2 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO CONVENCIONAL

Para realizar el procedimiento de caracterización de defectos en uniones soldadas es necesario preparar el equipo y las superficies a inspeccionar (probetas). Las probetas deben estar libres de residuos que puedan interferir en la medición o rayar los palpadores del equipo de ultrasonido.

### 10.2.1 Procedimiento de calibración.

Utilizando un bloque de calibración V2, se procede a realizar la calibración de la velocidad de propagación del sonido en el medio y se definen los ajustes del emisor y del filtro, esto con el fin de crear una imagen nítida del A-Scan, para el palpador angular de 70° y 5 MHz.



*Ilustración 25: Procedimiento de calibración inicial para la inspección ultrasónica. Fuente propia.*

### **10.3 REPORTE DE INSPECCIÓN PRELIMINAR**

Para realizar esta inspección el equipo debe estar previamente calibrado y ajustado como se mencionó anteriormente.

Una vez llevada a cabo la inspección se realizó un informe con los datos relevantes de la medición, como lo son los valores necesarios para desarrollar la ecuación de los criterios de aceptación de la AWS D1.1. Y una imagen del escaneo realizado en cada punto con la amplitud del A-Scan como se muestra a continuación:

## Probeta 1.

### Punto de inspección 1.

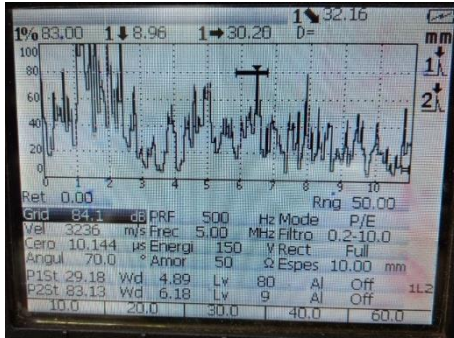


Ilustración 26: Probeta 1, punto 1. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
d=a-b-c			
c=			0.10
↓(valor obtenido de inspección)=			8.96
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			26.20
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
4.40	51.2	46.7	0.10
d[dB]=			4.40

Tabla 2: Resultado de inspección, probeta 1 punto 1.

### Punto de inspección 2.

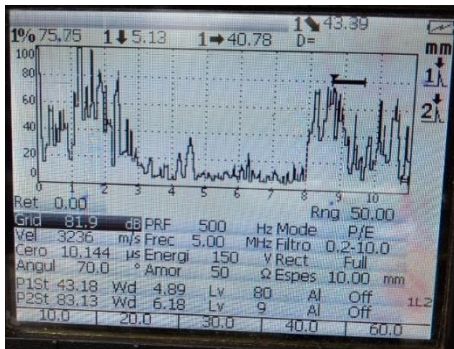


Ilustración 27: Probeta 1, punto 2. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
d=a-b-c			
c=			-0.80
↓(valor obtenido de inspección)=			5.13
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			15.00
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
3.90	49.8	46.7	-0.80
d[dB]=			3.90

Tabla 3: Resultado de inspección, probeta 1 punto 2.

### Punto de inspección 3.

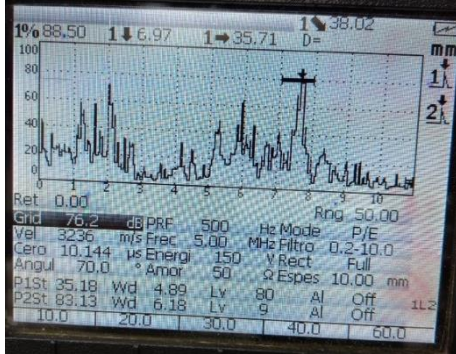


Ilustración 28: Probeta 1, punto 3. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			-0.37
↓(valor obtenido de inspección)=			6.97
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			20.38
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
1.87	48.2	46.7	-0.37
d[dB]=			1.87

Tabla 4: Resultado de inspección, probeta 1 punto 3.

### Punto de inspección 4.

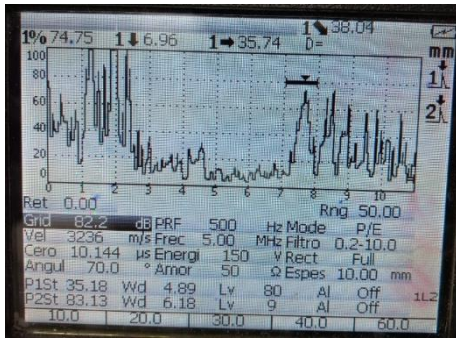


Ilustración 29: Probeta 1, punto 4. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			-0.37
↓(valor obtenido de inspección)=			6.96
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			20.35
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
4.17	50.5	46.7	-0.37
d[dB]=			4.17

Tabla 5: Resultado de inspección, probeta 1 punto 4.

**Punto de inspección 5.**

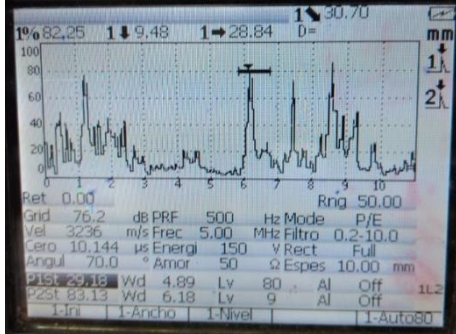


Ilustración 30: Probeta 1, punto 5. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			0.22
↓(valor obtenido de inspección)=			9.48
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			27.72
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
1.78	48.7	46.7	0.22
d[dB]=	1.78		

Tabla 6: Resultado de inspección, probeta 1 punto 5.

**Punto de inspección 6.**

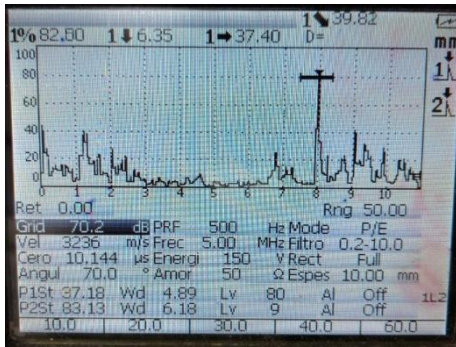


Ilustración 31: Probeta 1, punto 6. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			-0.51
↓(valor obtenido de inspección)=			6.35
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			18.57
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
3.01	49.2	46.7	-0.51
d[dB]=	3.01		

Tabla 7: Resultado de inspección, probeta 1 punto 6.



### Punto de inspección 7.

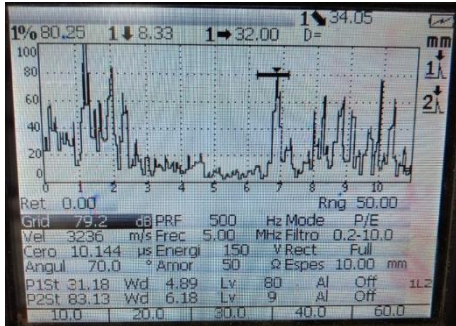


Ilustración 32: Probeta 1, punto 7. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
d=a-b-c			
c=			-0.05
↓(valor obtenido de inspección)=			8.33
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			24.36
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
0.35	47	46.7	-0.05
d[dB]=			0.35

Tabla 8: Resultado de inspección, probeta 1 punto 7.

### Punto de inspección 8.

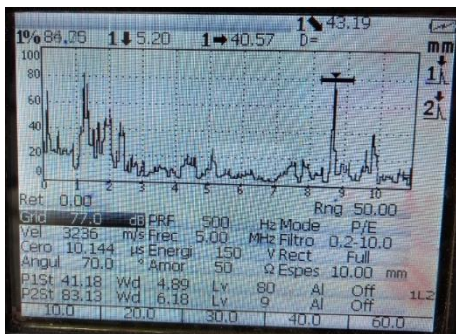


Ilustración 33: Probeta 1, punto 8. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
d=a-b-c			
c=			-0.78
↓(valor obtenido de inspección)=			5.20
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			15.20
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
2.58	48.5	46.7	-0.78
d[dB]=			2.58

Tabla 9: Resultado de inspección, probeta 1 punto 8.

## PROBETA 2

### Punto de inspección 1.

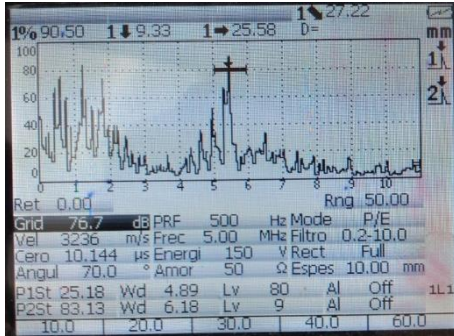


Ilustración 34: Probeta 2, punto 1. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			0.18
↓(valor obtenido de inspección)=			9.33
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			27.28
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
4.32	51.2	46.7	0.18
d[dB]=	4.32		

Tabla 10: Resultado de inspección, probeta 2 punto 1.

### Punto de inspección 2.

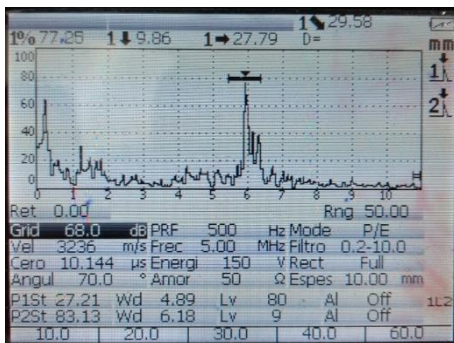


Ilustración 35: Probeta 2, punto 2. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			0.31
↓(valor obtenido de inspección)=			9.86
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			28.83
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
3.89	50.9	46.7	0.31
d[dB]=	3.89		

Tabla 11: Resultado de inspección, probeta 2 punto 2.

### Punto de inspección 3.

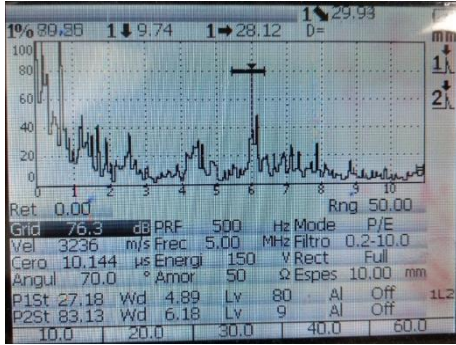


Ilustración 36: Probeta 2, punto 3. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
d=a-b-c			
c=			0.28
↓(valor obtenido de inspección)=			9.74
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			28.48
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
2.52	49.5	46.7	0.28
d[dB]=	2.52		

Tabla 12: Resultado de inspección, probeta 2 punto 3.

### Punto de inspección 4.

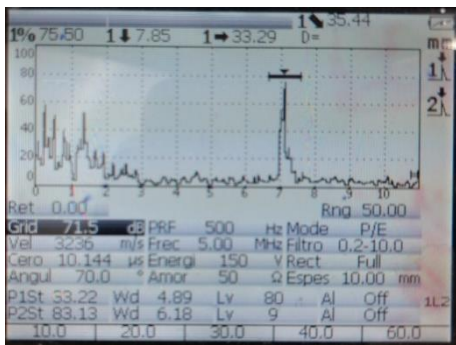


Ilustración 37: Probeta 2, punto 4. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
d=a-b-c			
c=			0.16
↓(valor obtenido de inspección)=			7.85
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			22.95
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
3.24	50.1	46.7	0.16
d[dB]=	3.24		

Tabla 13: Resultado de inspección, probeta 2 punto 4.



**Punto de inspección 5.**

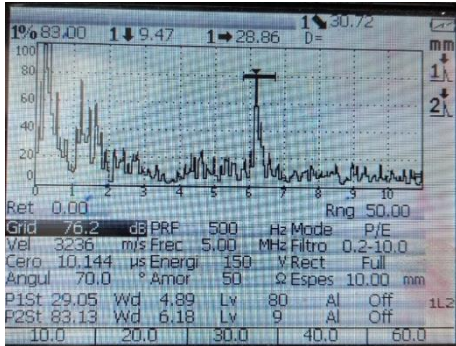


Ilustración 38: Probeta 2, punto 5. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			0.22
↓(valor obtenido de inspección)=			9.47
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			27.69
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
4.18	51.1	46.7	0.22
d[dB]=	4.18		

Tabla 14: Resultado de inspección, probeta 2 punto 5.

**Punto de inspección 6.**

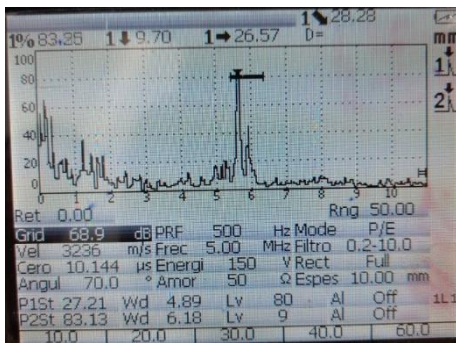


Ilustración 39: Probeta 2, punto 6. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			0.27
↓(valor obtenido de inspección)=			9.70
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			28.36
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
21.93	68.9	46.7	0.27
d[dB]=	21.93		

Tabla 15: Resultado de inspección, probeta 2 punto 6.

### Punto de inspección 7.

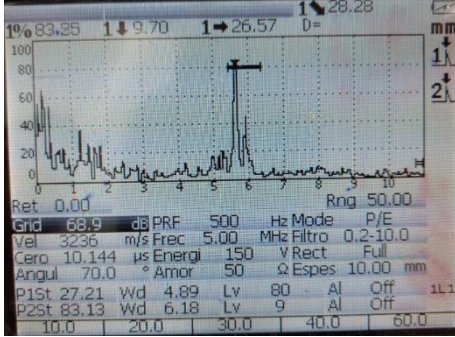


Ilustración 40: Probeta 2, punto 7. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			0.27
↓(valor obtenido de inspección)=			9.70
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			28.36
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
3.03	50	46.7	0.27
d[dB]=	3.03		

Tabla 16: Resultado de inspección, probeta 2 punto 7.

### Punto de inspección 8.

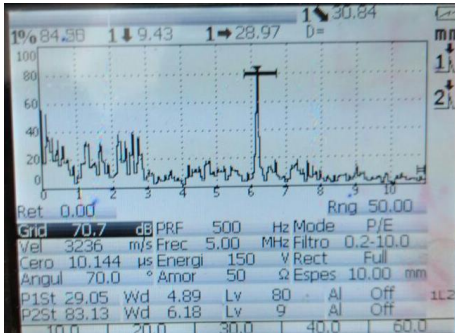


Ilustración 41: Probeta 2, punto 8. Fuente propia.

Ecuación para desarrollar los criterios de aceptación			
$d=a-b-c$			
c=			0.21
↓(valor obtenido de inspección)=			9.43
$\alpha^\circ$ (Angulo del transductor)=			70.00
h(hipotenusa distancia del rayo)=			27.57
d[dB]	a[dB]	b[dB]	c[dB]
1.59	48.5	46.7	0.21
d[dB]=	1.59		

Tabla 17: Resultado de inspección, probeta 2 punto 8.

#### 10.4 Análisis de resultados preliminares

Con los datos obtenidos de la inspección se procede a comparar el valor “d” con la tabla 6.2 (anexo 1) correspondiente a los criterios de aceptación o rechazo para soldaduras estáticamente cargadas, teniendo en cuenta que la zapata utilizada en la inspección posee un ángulo de 70° y que la probeta se encuentra en el rango de espesores de 8 mm a 20 mm. Después de realizar la evaluación en la tabla mencionada se obtiene lo siguiente:

<b>Probeta 1</b>		d	Clasificación de discontinuidades norma AWS D1.1
P U N T O	1	4.4	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	2	3.9	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	3	1.87	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	4	4.17	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	5	1.78	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	6	3.01	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	7	0.35	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	8	2.58	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.

<b>Probeta 2</b>		d	Clasificación de discontinuidades norma AWS D1.1
P U N T O	1	4.32	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	2	3.89	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	3	2.52	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	4	3.24	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	5	4.18	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	6	21.93	Discontinuidad tipo D, se acepta sin importar su longitud.
	7	3.03	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.
	8	1.59	Discontinuidad tipo A, se rechaza sin importar su longitud.

## 11 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PHASED ARRAY

Para realizar la inspección en phased array con el equipo VEO 16:64 SONATEST se llevó a cabo una serie de pasos con la finalidad de explorar las capacidades de este. A continuación se mostrará el procedimiento que se llevó a cabo:

### 11.1 Delimitación de la zona de barrido:

La norma AWS D1.1 establece una función que permite delimitar la zona de barrido, asegurando que el haz ultrasónico incida sobre el cordón de soldadura y no sobre el material base. Esta función depende del ángulo de la zapata y del espesor del material:

$$SD = 2 * e * \tan \alpha$$

Donde: **SD:** Distancia del barrido (mm).

**e:** Espesor del material (mm).

**$\alpha$ :** Ángulo de la zapata (°).

### 11.2 Calibración del equipo VEO 16:64 SONATEST:

Antes de comenzar cualquier tipo de inspección el equipo debe ser previamente calibrado, siguiendo los procedimientos de normatividad para esto. Cabe destacar que las calibraciones son propias para cada material a inspeccionar, por lo que si se cambia de material se deberá realizar una nueva calibración con un bloque de calibración del mismo material que será inspeccionado. Para la inspección se tuvo en cuenta una ganancia de referencia de 50 dB con la cual se realizó el ensayo de ultrasonido.

### 11.3 Parámetros de configuración Phased Array:

Para realizar esta inspección, el equipo debe estar previamente calibrado como se mencionó anteriormente; a continuación se muestran los parámetros de ajuste para el ensayo:

Palpador P1 - Phased-Array 1D					
Tipo de palpador	Phased-Array 1D	Pulse Type	Square-Wave	Elmt Offset Dim 1	3.20 mm
Fabricante	Sonatest	Ancho de Pulso	100.00 ns	Elmt Tamaño Dim 2	12.00 mm
Modelo #	Sonatest-T1-PE-5.0M32E0.8P	Nb Elmt Dim 1	32	Elmt Offset Dim 2	8.60 mm
Serial #	N/A	Elmt Paso Dim 1	0.80 mm	Elemento de diseño	Fondo Izquierda Fila
Frecuencia	5.00 Mhz	Elmt Tamaño Dim 1	0.76 mm		

Cuña P1 - Phased-Array 1D					
Tipo	Angular	Altura del respaldo	6.10 mm	Ángulo Superior	0.00°
Fabricante	Sonatest	Altura frontal	29.00 mm	Volver palpador Dist	1.60 mm
Modelo #	Sonatest-T1-35W0D-REXO	Ancho	31.90 mm	Distancia Lateral del Palpador	1.50 mm
Serial #	N/A	Longitud	54.00 mm	Inserción del palpador	0.00 mm
Superficie de contacto	Plano	Ángulo de corte	35.00°	Velocidad de cuña LW	2.330 mm/μs

Barrido S1 - Sectorial PE					
Tipo	Sectorial PE	Focalización	Profundidad Constante	Ultimoi Elmt TX	16
Ganancia , Ref	50.0 dB, 0.0 dB	Dist Focal	25.20 mm	Primer Elmt RX	1
Ganancia Software	-4.0 dB	PRF	1000 Hz	Ultimoi Elmt RX	16
Resolución	0.50°	Rectificación de señales	Completo	Haz Qty.	81
Ángulo de Inicio	30.00°	Digital Filter	Auto: 5.0 MHz	Muestra Qty.	3244
Ángulo de Fin	70.00°	Sub-muestreo	Auto: 1:4	Res Trayectoria.	15.4 spl/mm
Inicio de Trayectoria	0.00 mm	Rejection	Desactivado	Acq. Freq.	100 MHz
Rango de la trayectoria	210.00 mm	Suavizado	Alto	Velocity Cal Status	Ninguno
Parar Trayectoria	210.00 mm	Contouring	No	Estado de Cal Cuña de retraso	Ninguno
Zero	0.00 μs	PApador TX/RX	P1 - Phased-Array 1D	Estado de Cal de la Sensibilidad	Ninguno
Modo de Onda	SW Velocidad	Palpador RX	P1 - Phased-Array 1D	Tolerancia Amp	5.00%
Modo de Desplazamiento	Media Trayectoria	El primer Elmt TX	1		

Ilustración 42: Parámetros de operación Phased Array. (Fuente, equipo VEO 16:64 SONATEST)

## 12 INSPECCIÓN, REPORTE Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez finalizada la inspección se realizó un informe y se generó el reporte con los datos relevantes de cada medición. Además de esto, se anexó la imagen del escaneo sectorial S-Scan realizado en cada punto con la amplitud del A-Scan como se muestra a continuación:

### 12.1 PROBETA 1

Parte	Info
Material	Acero
Velocidad [LW/SW]	5.890 mm/μs, 3.240 mm/μs
Part Geometry	Plate
Espesor	12.00 mm
Soldadura	Single V



Ilustración 43: Especificaciones de la probeta 1. (Fuente, equipo VEO 16:64 SONATEST)

### 12.1.1 Reporte punto 1 y 2

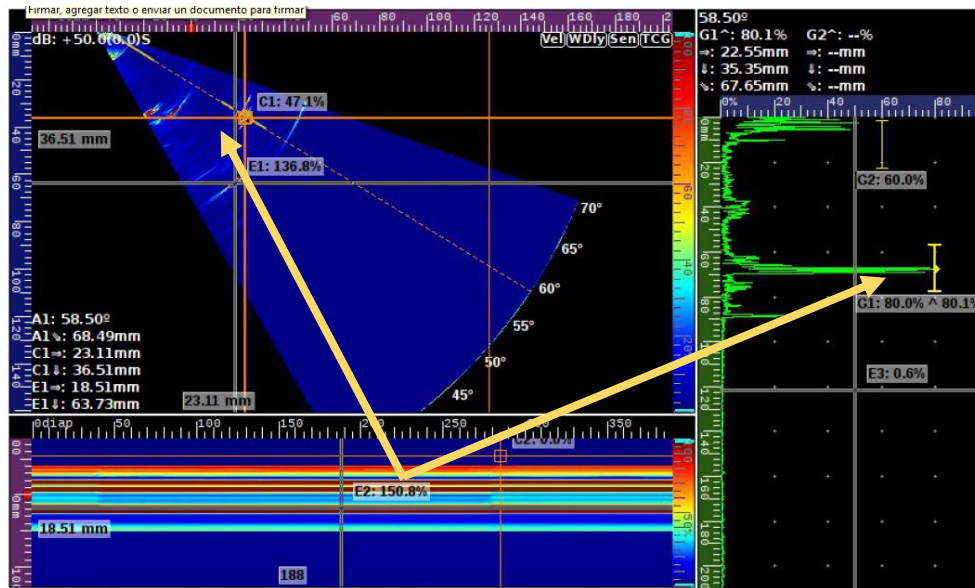


Ilustración 44: Reporte de inspección punto 1 y 2 probeta1. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Al observar la ilustración 42 se puede evidenciar la información que permitirá determinar el tipo de discontinuidad que se presenta en los punto 1 y 2, las características visuales del S-scan son esenciales para corroborar la identificación de los defectos producto de la inspección ultrasónica, los resultados de esta inspección están basados en la comparación entre el ultrasonido convencional A-scan realizado preliminarmente y el análisis de phased array realizado con el equipo veo 16:64. Se establece que en este caso la discontinuidad encontrada es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN de acuerdo a la literatura especializada que fue parte de la investigación, gracias a esto se puede comprender el comportamiento de la onda ultrasónica al encontrarse este tipo de defecto, en donde es producido un eco angosto y bien definido que puede ser detectado desde cualquier dirección de la zona de barrido. Se concluye que la grieta de solidificación es una discontinuidad tipo A según los criterios de la norma AWS D1.1, la cual es rechazada sin importar su longitud o tamaño.



### 12.1.2 Reporte punto 3

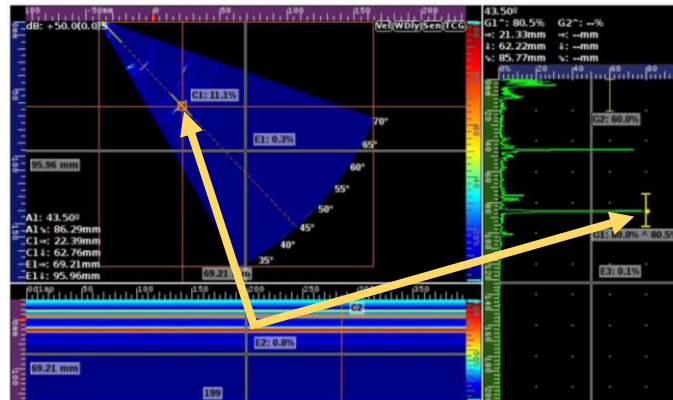


Ilustración 45: Reporte de inspección punto 3 probeta1. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN, presentándose además otra grieta de gran tamaño en cerca de la zona analizada. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

### 12.1.3 Reporte punto 4

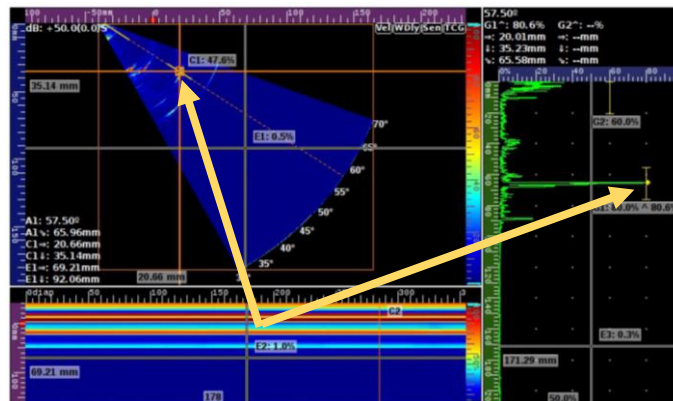


Ilustración 46: Reporte de inspección punto 4 probeta1. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta de solidificación es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

### 12.1.4 Reporte punto 5

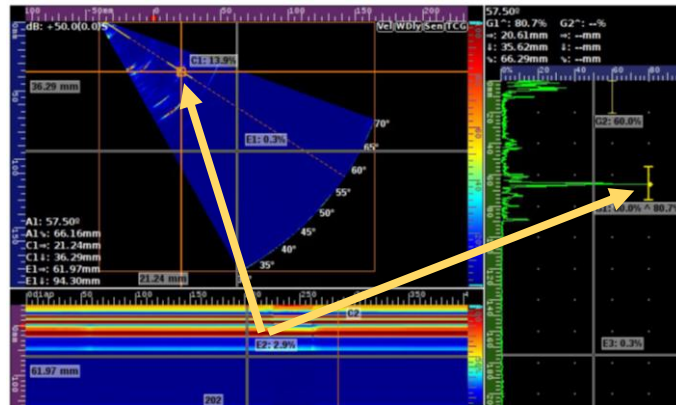


Ilustración 47: Reporte de inspección punto 5 probeta1. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.:

#### Análisis de resultados:

Teniendo en cuenta los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN acompañada de pequeñas porosidades. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

### 12.1.5 Reporte punto 6

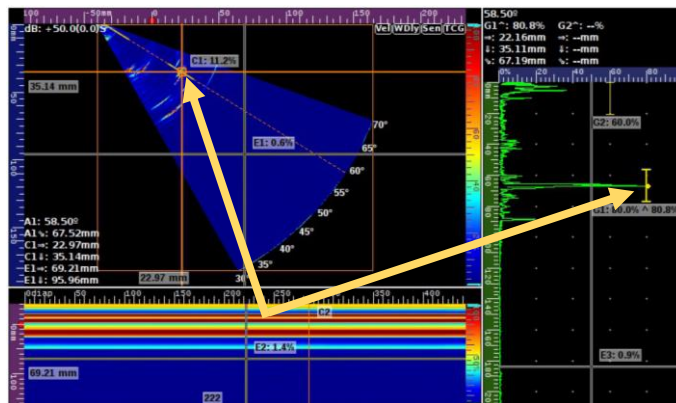


Ilustración 48: Reporte de inspección punto 6 probeta1. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN acompañada de pequeñas porosidades. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.



### 12.1.6 Reporte punto 7

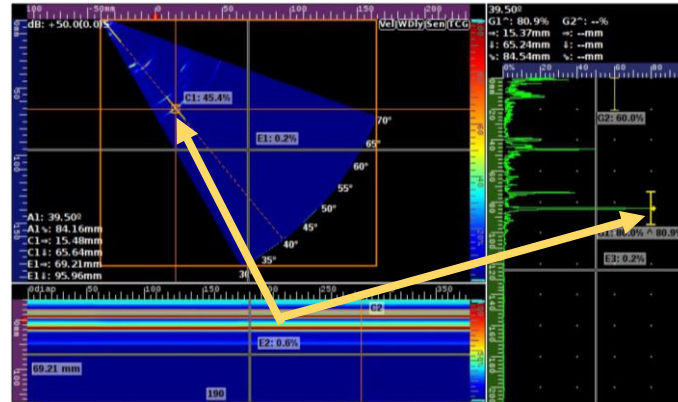


Ilustración 49: Reporte de inspección punto 7 probeta1. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta de solidificación es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

### 12.1.7 Reporte punto 8

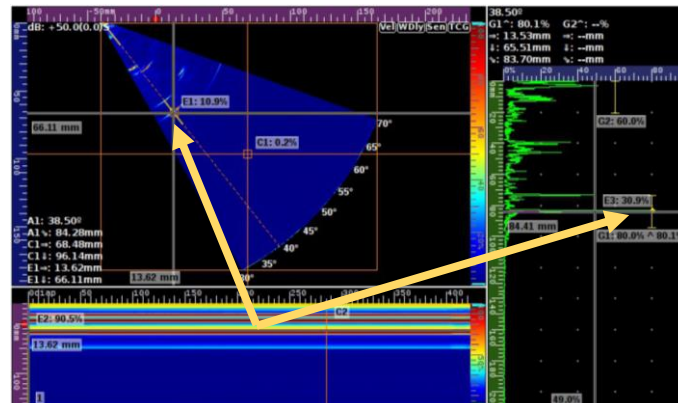


Ilustración 50: Reporte de inspección punto 8 probeta1. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN, presentándose además una variedad de discontinuidades cercanas que podrían ser grietas presentes en esta zona de la soldadura. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

## 12.2 PROBETA 2

Info codificador	
Configuración de codificación	Ninguno
Parte	Info
Material	Acero
Velocidad [LW/SW]	5.890 mm/μs, 3.240 mm/μs
Part Geometry	Plate
Espesor	10.00 mm
Soldadura	Single V

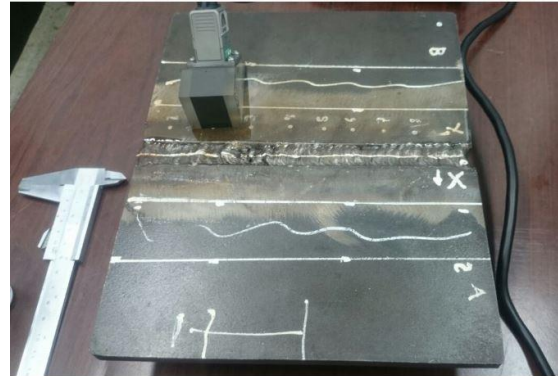


Ilustración 51: Especificaciones de la probeta 2. (Fuente, equipo VEO 16:64 SONATEST)

### 12.2.1 Reporte punto 1

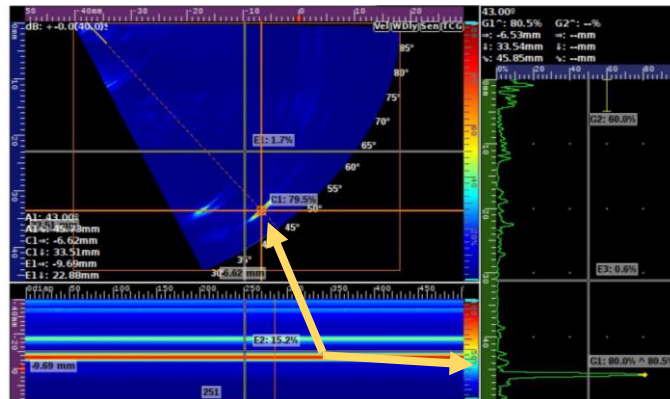


Ilustración 52: Reporte de inspección punto 1 probeta 2. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

### Análisis de resultados:

Teniendo en cuenta el comportamiento observado en la ilustración 49 se puede señalar la información que permitirá determinar el tipo de discontinuidad que se presenta en los punto 1 y 2, las características visuales del S-scan son esenciales para corroborar la identificación de los defectos producto de la inspección ultrasónica, los resultados de esta inspección están basados en la comparación entre el ultrasonido convencional A-scan realizado preliminarmente y el análisis de phased array realizado con el equipo veo 16:64.

Se establece que en este caso la discontinuidad encontrada es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN de acuerdo a la literatura especializada que fue parte de la investigación, gracias a esto se puede comprender el comportamiento de la onda ultrasónica al encontrarse este tipo de defecto, en donde es producido un eco angosto y bien definido que puede ser detectado desde cualquier dirección de la zona de barrido. Se concluye que la grieta de solidificación es una discontinuidad tipo A según los criterios de la norma AWS D1.1, la cual es rechazada sin importar su longitud o tamaño.

### 12.2.2 Reporte punto 2

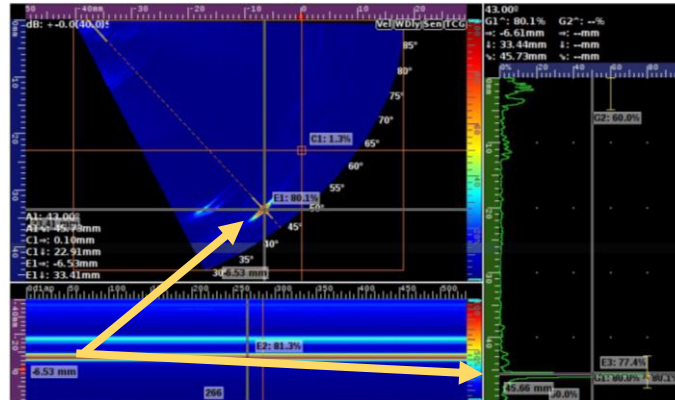


Ilustración 53: Reporte de inspección punto 2 probeta 2. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

### 12.2.3 Reporte punto 3

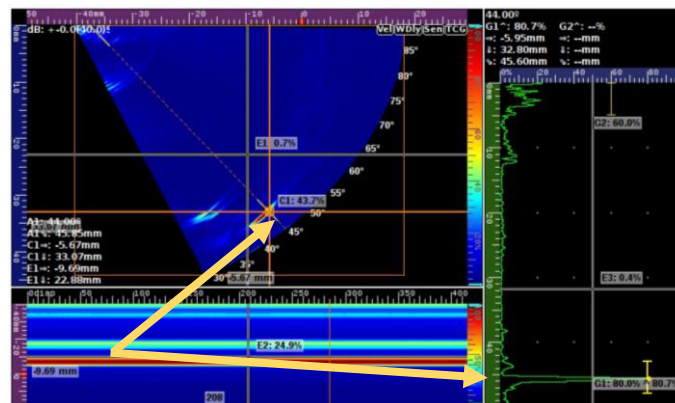


Ilustración 54: Reporte de inspección punto 3 probeta 2. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

## 12.2.4 Reporte punto 4

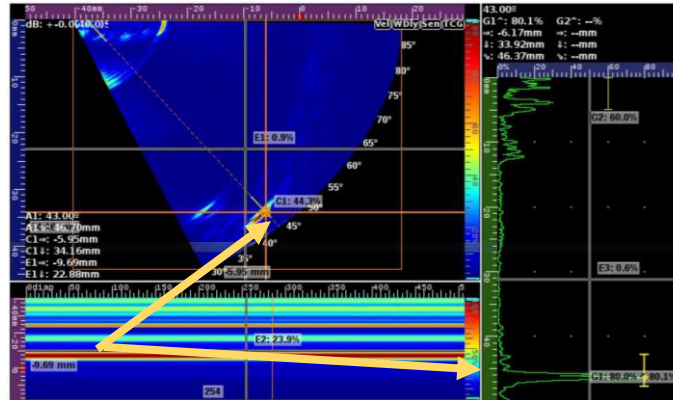


Ilustración 55: Reporte de inspección punto 4 probeta 2. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

### Análisis de resultados:

Teniendo en cuenta los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

## 12.2.5 Reporte punto 5

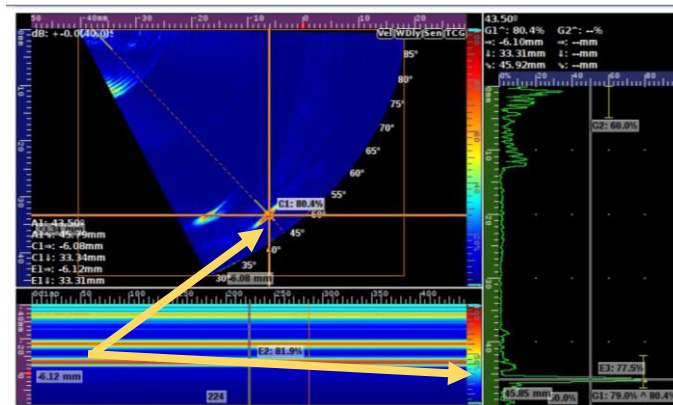


Ilustración 56: Reporte de inspección punto 5 probeta 2. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

### 12.2.6 Reporte punto 6

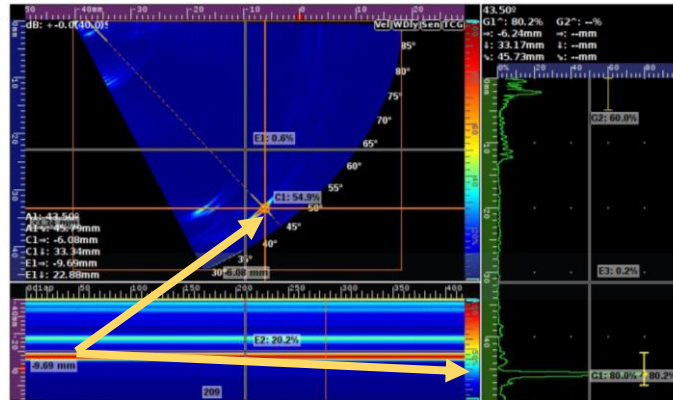


Ilustración 57: Reporte de inspección punto 6 probeta 2. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Teniendo en cuenta los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo D la cual se acepta sin importar su longitud o tamaño.

### 12.2.7 Reporte punto 7

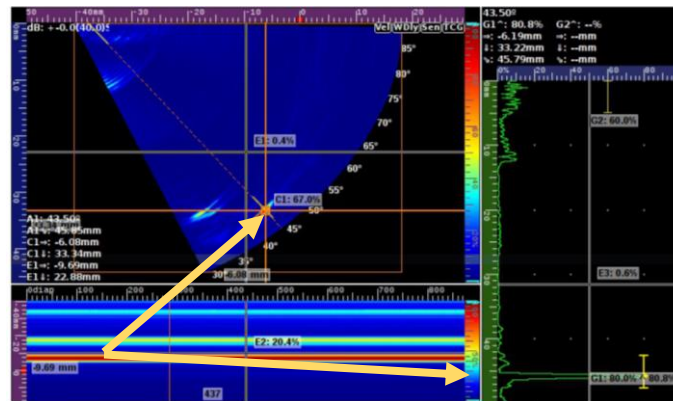


Ilustración 58: Reporte de inspección punto 7 probeta 2. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

#### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

## 12.2.8 Reporte punto 8

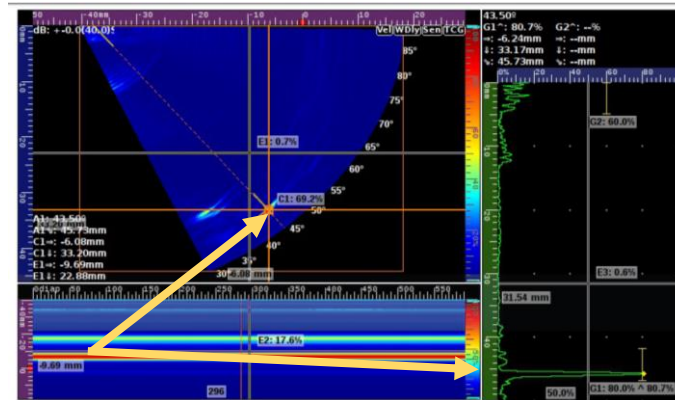


Ilustración 59: Reporte de inspección punto 8 probeta 2. Provisto por equipo VEO 16:64 SONATEST.

### Análisis de resultados:

Con base a los datos de referencia y los resultados obtenidos con el análisis por el método de phased array, se concluye que la falla encontrada en este punto de la probeta es una GRIETA DE SOLIDIFICACIÓN. Teniendo como referencia el análisis realizado en A-Scan, se dice que la grieta es una discontinuidad tipo A la cual se rechaza sin importar su longitud o tamaño.

## 13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 13.1 CONCLUSIONES

- Como resultado de la investigación realizada acerca del funcionamiento del equipo VEO 16:64 SONATEST, se logró comprender y analizar los procesos y funcionamientos básicos de este. Además de esto se concluye que para una mejor manipulación y con el objetivo de alcanzar unos resultados más precisos, se hace necesario un mejor adiestramiento orientado por un tutor capacitado.
- Durante las pruebas de ultrasonido realizadas a las probetas seleccionadas se encontró que debido a la falta de conocimiento en el manejo y calibración del equipo VEO 16:64 SONATEST se debió utilizar un equipo de ultrasonido convencional como apoyo para los análisis; lo anterior a fin de dar continuidad al proyecto, aun cuando el uso de esta máquina no estuviese contemplado en los objetivos y alcance inicial del proceso.
- Al analizar los defectos y discontinuidades presentes en las diferentes uniones soldadas, se observó que en las probetas seleccionadas se presentó mayormente discontinuidades compuestas por escasa penetración de la soldadura, lo cual generó fisuras y grietas de solidificación a lo largo del cordón.
- A razón de la falta de conocimiento del manejo del equipo VEO 16:64 SONATEST no se logró determinar el tamaño de las discontinuidades presentes en las probetas, aun así se resalta nuevamente la importancia de poseer mayores conocimientos en el manejo del equipo VEO 16:64 SONATEST puesto que se evidencio la gran capacidad de éste para generar resultados concisos y de elevada precisión.
- Tomando como referencia los análisis de los datos obtenidos, se encontró que en las probetas seleccionadas, en su mayoría presenta defectos causados por una escasa penetración en la soldadura, generando grietas de solidificación y poros a lo largo del cordón, lo anterior se corroboró con lo establecido en la norma AWS D1.1, la cual establece que este tipo de defectos se deben rechazar sin importar su longitud.



## 13.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la facultad de ingeniería mecánica de la universidad tecnológica de Pereira que se estudien las posibilidades de dictar un curso o diplomado de ultrasonido para la comunidad estudiantil con énfasis en Phased Array y escaneo sectorial (S-scan), ya que se está desaprovechando tan valioso recurso como lo es el equipo VEO 16:64 SONATEST ubicado en el Centro de Ensayos no Destructivos de la facultad. Uno de los aspectos que más llamo a la atención durante el trabajo de investigación es que no es suficiente con emplear tecnología de punta, ya que siempre será necesario personal capacitado y procedimientos validados para que el ensayo sea altamente confiable.



## 14 Bibliografía

- [1] Su casa de Soldadura, (2008) [en línea] disponible en: <http://www.solysol.com.es/productos-y-servicios/despues-de-soldar/control-de-calidad-de-soldaduras/>
- [2] Metalografía, E. (2015). *Metalografía – Universidad Tecnológica De Pereira*. [En línea] disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/ensayos-no-destructivos-pt-pm-rx/>
- [3] Compañía Internacional de Mantenimiento. [En línea] disponible en: <http://cima-co.com>
- [4] Inspección por análisis de vibraciones. [En línea] disponible en: [http://static.wixstatic.com/media/c8d0b7\\_eb611b876a644866af304247c770b477~mv2.jpg\\_srz\\_383\\_240\\_85\\_22\\_0.50\\_1.20\\_0.00\\_jpg\\_srz](http://static.wixstatic.com/media/c8d0b7_eb611b876a644866af304247c770b477~mv2.jpg_srz_383_240_85_22_0.50_1.20_0.00_jpg_srz)
- [5] Innovators in Non-Destructive Testing, “VEO” [en línea] disponible en: <http://innndt.com/productos/sonatest/veo/>
- [6] SINTEC “Sistemas de insonorización para la industria y medio ambiente” Conceptos fundamentales del sonido, Barcelona, [en línea] disponible en: <http://www.acdacustics.com/files/conceptos.pdf>
- [7] Características de las ondas. (2015). [En línea] disponible en: <http://elbibliote.com/resources/Temas/html/632.php>
- [8] Enciclopedia de Clasificaciones. (2016). *Tipos de ondas*. [En línea] disponible en: <http://www.tiposde.org/ciencias-exactas/66-tipos-de-ondas/>
- [9] Ondas de Rayleigh. [En línea] disponible en: [http://www.visindavefur.is/myndir/rayleigh\\_bylgja\\_800\\_040614.jpg](http://www.visindavefur.is/myndir/rayleigh_bylgja_800_040614.jpg)
- [10] REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA. [En línea] disponible en: <http://diccionario.raing.es/es/lema/onda-de-lamb>

[11] SONATEST VEO User Guide. V3.5. Copyright © 2013 SONATEST Limited,  
Disponible en el equipo VEO.

[12] AWS D1.1: Structural Welding Code—Steel, 17<sup>th</sup> Edition. American Welding  
Society. (1999) [En línea] disponible en:  
<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/aws.d1.1.2000.pdf>

## 15 ANEXOS

### Anexo 1. Criterios de aceptación o rechazo

**Tabla 6.2**  
**Criterio UT de Aceptación-Rechazo (Conexiones No-Tubulares Estáticamente Cargadas)**  
**(ver 6.13.1 y C-6.26.6)**

Clase de Severidad de Discontinuidad <sup>a</sup>	Tamaño de Soldadura <sup>a</sup> en pulgadas [mm] y Ángulo de Unidad de Búsqueda												
	5/16 hasta 3/4 [8-20]		> 3/4 hasta 1-1/2 [20-38]		> 1-1/2 hasta 2-1/2 [38-65]			> 2-1/2 hasta 4 [65-100]			> 4 hasta 8 [100-200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°		
Clase A	+5 & menor	+2 & menor	-2 & menor	+1 & menor	+3 & menor	-5 & menor	-2 & menor	0 & menor	-7 & menor	-4 & menor	-1 & menor		
Clase B	+6	+3	-1 0	+2 +3	+4 +5	-4 -3	-1 0	+1 +2	-6 -5	-3 -2	0 +1		
Clase C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	-2 a +2	+1 +2	+3 +4	-4 a +2	-1 a +2	+2 +3		
Clase D	+8 & mayor	+5 & mayor	+3 & mayor	+6 & mayor	+8 & mayor	+3 & mayor	+3 & mayor	+5 & mayor	+3 & mayor	+3 & mayor	+4 & mayor		

<sup>a</sup> El espesor de la soldadura debe definirse como el espesor nominal del elemento estructural de menor espesor a ser unido.

Notas:

1. Las discontinuidades de Clase B deben estar separadas al menos por 2L, siendo L la longitud de la mayor discontinuidad, excepto cuando dos o más de tales discontinuidades no están separadas por al menos 2L, pero la longitud de las discontinuidades y su separación es igual o menor que la longitud máxima permisible bajo las disposiciones de las Clases B o C, la discontinuidad debe considerarse como una única discontinuidad aceptable.
2. Las discontinuidades de Clase B y C no deben comenzar a una distancia menor que 2L desde los finales de las soldaduras que soportan esfuerzos de tracción principales, siendo L el largo de la discontinuidad.
3. Las discontinuidades detectadas en el área de la cara de la raíz en una soldadura con CJP con bisel doble, deben ser evaluadas usando una clasificación de la indicación 4 dB más sensible, que la descrita en 6.26.6.5, cuando tales soldaduras son indicadas como "soldadura bajo tracción" en los planos (restar 4 dB para el nivel de referencia "b").
4. Soldaduras por electroescoria o electrogas: en las discontinuidades que exceden las 2 pulg. [50 mm] se deben sospechar que son de porosidad vermicular y deberá ser examinada adicionalmente mediante radiografía.
5. Para indicaciones que se mantienen en el monitor, cuando el palpador se mueve, referirse a 6.13.1.

**Clase A (discontinuidades grandes)**  
Cualquier indicación en esta categoría debe ser rechazada (sin tener en cuenta la longitud).

**Clase B (discontinuidades medias)**  
Cualquier indicación en esta categoría que tenga una longitud mayor que 3/4 pulg. [20 mm] debe ser rechazada.

**Clase C (discontinuidades pequeñas)**  
Cualquier indicación en esta categoría que tenga una longitud mayor que 2 pulg. [50 mm] debe ser rechazada.

**Clase D (discontinuidades menores)**  
Cualquier indicación en esta categoría debe ser aceptada sin tener en cuenta la longitud o ubicación en la soldadura.

Niveles de Escaneo/Exploración	
Trayectoria <sup>b</sup> en pulg. [mm]	Referencia por Encima de Cero, dB
hasta 2-1/2 [65 mm]	14
> 2-1/2 hasta 5 [65-125 mm]	19
> 5 hasta 10 [125-250 mm]	29
> 10 hasta 15 [250-380 mm]	39

<sup>b</sup> Esta columna se refiere a la distancia recorrida por el haz, NO al espesor del material.

*Ilustración 60: Criterios de aceptación o rechazo según norma AWS D1.1. [12]*

## Anexo 2. Planos

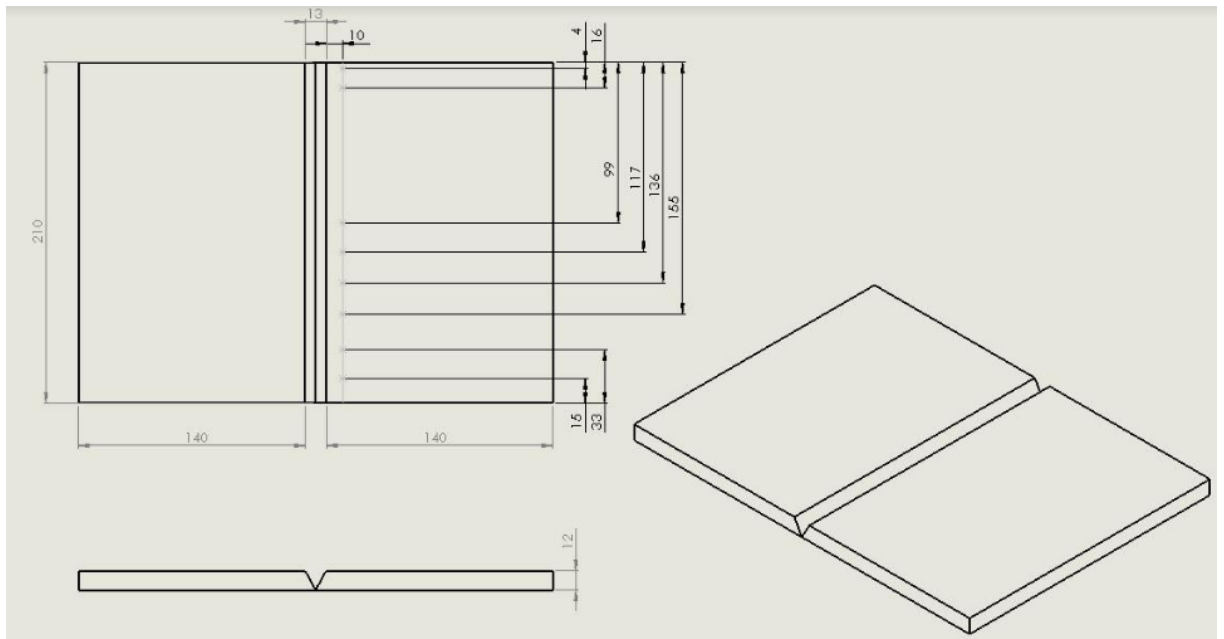


Ilustración 61: Planos probeta 1.

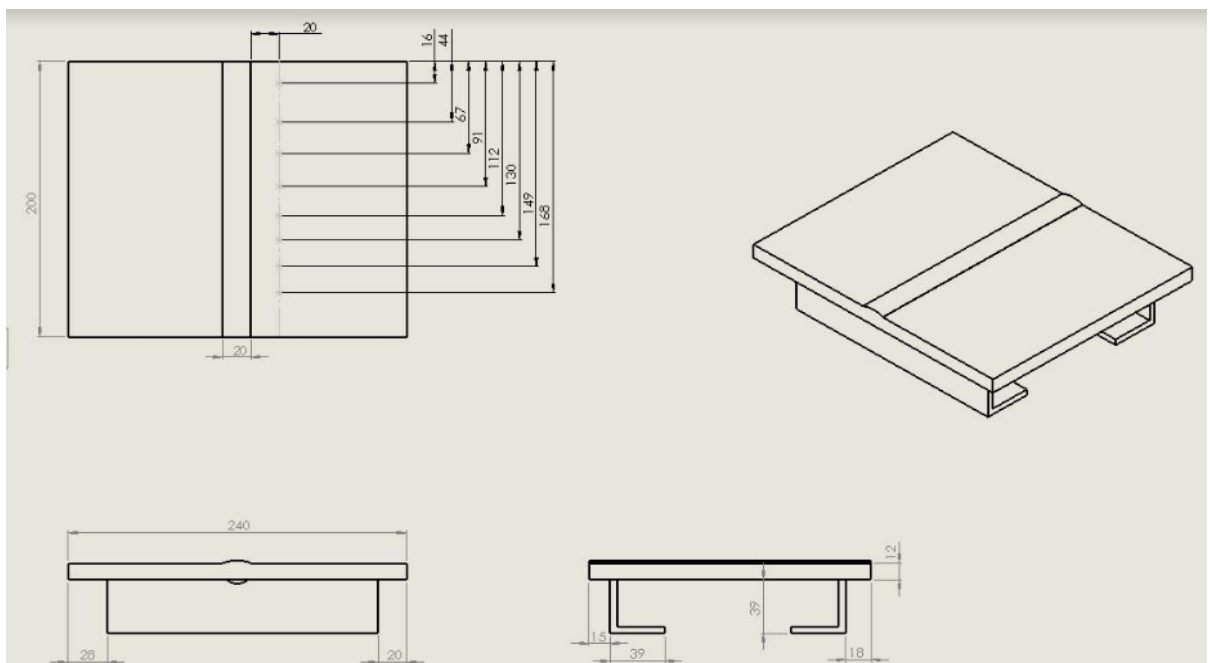


Ilustración 62: Planos probeta 2.