

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE ULTRASONIDO Y  
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL UTILIZADAS EN LA FABRICACIÓN DE  
TUBERÍAS DE ACERO API 5L X70 MEDIANTE EL PROCESO DE ARCO  
SUMERGIDO”**

**POR**

**ÁNGEL GERARDO RAMÓN GAMAS**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA**

**SALTILLO, COAHUILA, A 20 DE SEPTIEMBRE DE 2013**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE ULTRASONIDO Y  
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL UTILIZADAS EN LA FABRICACIÓN DE  
TUBERÍAS DE ACERO API 5L X70 MEDIANTE EL PROCESO DE ARCO  
SUMERGIDO”**

**POR**

**ÁNGEL GERARDO RAMÓN GAMAS**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA**

**SALTILLO, COAHUILA, A 20 DE SEPTIEMBRE DE 2013**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales  
Gerencia de Desarrollo Humano  
División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE ULTRASONIDO Y RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL UTILIZADAS EN LA FABRICACIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO API 5L X70 MEDIANTE EL PROCESO DE ARCO SUMERGIDO”** realizada por el alumno **ÁNGEL GERARDO RAMÓN GAMAS**, con número de matrícula **12ES-142** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

**El Comité Tutorial**

---

**MT. Víctor Hugo López Cortez**  
Tutor Académico

---

**MC. Gabriel García Cerecero**  
Tutor en Planta

---

**MC. Fernando Macías López**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Coordinador de Posgrado

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **ÁNGEL GERARDO RAMÓN GAMAS**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE ULTRASONIDO Y RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL UTILIZADAS EN LA FABRICACIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO API 5L X70 MEDIANTE EL PROCESO DE ARCO SUMERGIDO**”, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 20 días del mes de septiembre del 2013.

---

**Dr. Fernando Martínez Díez**  
Presidente

---

**MC. Alfonso Ballesteros Hinojosa**  
Secretario

---

**MT. Víctor Hugo López Cortez**  
Vocal

## AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), en especial a la Coordinación de Posgrado y a las personas que lo integran, por permitirme ser parte de esta institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por ser el proveedor de los recursos económicos para la manutención durante el desarrollo de esta monografía.

A la empresa Tubacero S.A de C.V. por las facilidades prestadas, y al MC. Gabriel García Cerecero por haber confiado y permitido ser parte de su equipo durante la realización de este proyecto, al haberme proporcionado el tema desarrollado.

A la ingeniera María Eugenia Herrera López quien siempre está al pié del cañón apoyando y alentando a seguir a delante y quien creyó en este servidor.

Y sobre todo a mi asesor al MT. Víctor Hugo López Cortez, quien compartió sus conocimientos, y al comité tutorial.

A la Universidad Politécnica de Cataluña y al CTM, junto al Dr. José María Cabrera Marrero y al Dr. Víctor Gerardo García Fernández.

A la M.I Noemí Méndez de los Santos.

## DEDICATORIAS

Antes que nada a mi señor DIOS, quien me ha dado la dicha de la vida, y poder disfrutar de ella, quien me pone en el día a día obstáculos para hacerme un hombre de bien.

A mi madre quien ha sido un todo para mí, la señora Hilda Gamas Fuentes, y a mi padre Miguel Ángel Ramón Ramos +, quien desde siempre ha sido mi angelito de la guardia e ilumina mi camino día con día.

A mis tíos David Mauricio Unda Rosique y Jacqueline Gamas Fuentes, Concepción Gamas y Manuel Zapata quienes confiaron en mí y me dieron toda el apoyo posible para emprender esta nueva etapa en mi vida, eternamente agradecido con ellos.

A esos viejitos hermosos que son mis abuelos, quienes han sido como mis segundos padres.

A mi familia en general y aquellos amigos incondicionales que han sido y seguirán siendo parte de mi camino, y que siempre tienen una palabra para hacer ameno la situación por muy difícil que haya sido.

En especial para aquellos que siempre han señalado y dudaron que pudiera ser el hombre que soy, a todos ellos, gracias por hacerme entender que lo que no mata te fortalece.

En general GRACIAS a todos por ese apoyo incondicional, y esas palabras de aliento de JAMÁS DARSE POR VENCIDO.

PARA ATRÁS NI PARA TOMAR IMPULSO.

## CONTENIDO

<b>SÍNTESIS</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación	4
1.4. Planteamiento del problema	4
1.5. Aporte tecnológico	5
1.6. Alcance	5
<b>CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>6</b>
2.1. Fabricación de tuberías	6
2.1.1. Materiales empleados para la fabricación de tuberías	7
2.1.1.1 Aceros	7
2.1.1.2 Especificación API 5L para tuberías en línea	10
2.1.2 La soldadura y su definición	11
2.1.2.1 Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW)	12
2.2. Discontinuidades posibles en la soldadura	20
2.3. Inspección de soldadura	33
2.3.1. Importancia de la inspección de soldadura	33
2.3.2. Ciclos para la inspección de soldadura.	34
2.4. Pruebas no destructivas	36
2.4.1. Ensayo no destructivo por ultrasonido	38
2.4.1.1. Principio y descripción de la técnica	39
2.4.1.2. Equipo básico	40
2.4.1.3. Características generales de ondas ultrasónicas	41
2.4.1.4. Principales variables de inspección ultrasónica	44
2.4.1.5. Métodos empleados por ultrasonido	47
2.4.1.6. Ventajas y desventajas del ultrasonido	50
2.4.1.7. Innovaciones de la técnica de ultrasonido convencional	52
2.4.2. Ensayo no destructivo por radiografía	56
2.4.2.1. Principios y descripción de la técnica	56
2.4.2.2. Equipo de radiografía	57
2.4.2.3. Calidad de una imagen radiográfica	58
2.4.2.5. Ventajas y desventajas de los rayos “X”	59

<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>61</b>
<b>CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO</b>	<b>63</b>
4.1. Metodología	64
4.2. Materiales	65
4.3. Experimentos realizados	66
4.4. Resultados	66
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN</b>	<b>72</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>74</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS</b>	<b>78</b>
<b>LISTADO DE TABLAS</b>	<b>79</b>
<b>RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO</b>	<b>80</b>

## SÍNTESIS

La industria de transportación de hidrocarburos es una de las principales actividades económicas que rigen a México, para ello se requieren de componentes de buena calidad para la realización de dicha actividad, por lo que procesos de soldadura son aplicados para la formación de tuberías que estén libres de toda discontinuidad que pueda ocasionar la falla o pérdida total del elemento.

En el documento presente se realizó el estudio del estado del arte de los ensayos no destructivos (END) aplicados en la inspección de tuberías soldadas con el proceso de arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés), así como las innovaciones actuales de dichos métodos.

La realización de un caso de estudio fue llevado a cabo, por medio de inspección de soldadura con un ultrasonido con arreglo de fases de la marca OLYMPUS OMNISCAN con un transductor de 5 MHz compuesto de 64 cristales piezoeléctrico, capaz de transmitir ondas transversales obteniendo resultados óptimos.

Dicho estudio se llevó a cabo en la Universidad Politécnica de Cataluña, además que a base de la literatura estudiada se cumplió con uno de los objetivos que fue el de proponer un END capaz de proporcionar resultados de mayor calidad y en tiempos más rápidos, uno de los ensayos propuestos fue el de ultrasonido por láser pulsado que permita la inspección de elementos en caliente ya que no requiere de contacto directo con la pieza.

Además de lograr un cuadro comparativo de los diversos END mencionados en el documento, que permitirá a la empresa Tubacero, llevar un mejor control sobre la detección de las discontinuidades presentes en la fabricación de su producto.

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

Por años la soldadura ha ido opacando el uso de tornillos para la unión de piezas, por lo que ésta tomó una fuerte importancia para el desarrollo tanto industrial como el humano. La soldadura es un proceso capaz de unir más de dos piezas promoviendo resistencia en las piezas así como otras propiedades mecánicas.

La soldadura ha acaparado un sinfín de campos para su uso, uno de ellos el de soldadura para tuberías, ya que permite la transportación de productos de hidrocarburos, el cual es uno de los campos de mayor importancia en la industria petrolera. Los ductos transportan de manera segura la materia prima, históricamente su uso se presenta para crudos, gas natural, gasolinas y condensados.

Se cuenta con diversos procesos de soldadura lograr la unión del acero durante la manufacturación de la tubería, los cuales han evolucionado con el paso del tiempo, entre los cuales se puede mencionar al proceso por arco sumergido también conocido como SAW (por sus siglas en inglés). La tubería realizada para la transportación de los hidrocarburos son fabricados con diversos aceros de acuerdo al tipo de material a transportar, todos deben de coincidir en brindar las mejores propiedades de resistencia a presiones, y todos aquellos esfuerzos que puedan causar fallas en el acero ya hecho tubo, así como en el cordón de soldadura. Para ello se han implementado diversas pruebas no destructivas para determinar si hay posibles fallas y/o defectos que

perjudiquen al producto final, siendo las más efectivas el ultrasonido el cual con el paso de tiempo ha tenido una evolución en su uso.

En la actualidad la técnica más empleada de ultrasonido es una denominada “prueba de ultrasonido por arreglo de fases”, además se encuentra la prueba de radiografía. [1].

La empresa Tubacero S.A de C.V empresa fundada en 1943, ofrece a sus clientes actualmente tubos desde 6 5/8" hasta 30" y 36", tubos con doble soldadura por arco sumergido de 20 a 150" de formado piramidal. Tubacero cuenta con certificación del Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés) desde 1959 fue el primer fabricante de tubería de línea soldada longitudinalmente en el hemisferio occidental en tener la certificación ISO 9002, empleando el proceso de soldadura de arco sumergido.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Establecer un análisis comparativo sobre las técnicas no destructivas de ultrasonido y radiografía en la detección de discontinuidades durante la fabricación de tuberías API 5L X70 mediante el proceso de arco sumergido.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar y analizar cuáles son las discontinuidades más comunes generadas en la fabricación de tuberías soldadas por el proceso SAW.
- Documentar y establecer cuáles son los métodos de ensayos no destructivos más apropiados en el control de calidad durante la fabricación de tuberías
- Realizar un análisis comparativo de las ventajas y limitantes de los métodos de ensayos no destructivos de ultrasonido y radiografía en la inspección de tuberías
- Realizar un caso de estudio para demostrar las cualidades de un ultrasonido con arreglo de fases.

- Proponer si existe alguna prueba no destructiva que brinde mejores resultados.

### **1.3. Justificación**

Debido a ciertas fallas que se han presentado en las tuberías de la industria petrolera se han ocasionado grandes catástrofes, estas pueden ser ocasionadas por los efectos de trabajo a los que se someten las tuberías, así como los defectos presentes en el cordón de soldadura aplicado para la unión.

Es importante hacer este trabajo por que concentrará información que le permitirá a las empresas conocer cómo evaluar las soldaduras de las tuberías fabricadas por procesos manuales y automáticos. Y así poder determinar los posibles defectos que se pueden encontrar en la soldadura de tubos API 5L X70, así como todo tipo de componentes soldados con los diferentes procesos de soldadura, para así prevenir los accidentes.

Los cordones realizados para las tuberías de Tubacero son producidos por el proceso SAW. El conocimiento de dos técnicas de inspección no destructivas se analizará debido a que una prueba puede cubrir aspectos que la otra no puede lograr, y así determinar las diferencias entre pruebas y cuál puede ser más óptima para detectar los defectos, con el fin antes mencionado que es el de evitar accidentes y tener una mayor producción de tubos.

### **1.4. Planteamiento del problema**

El entorno de trabajo, el material, el proceso de soldadura empleado así como el personal que participa para la fabricación de la tubería dentro de la empresa Tubacero, se han convertido en factores que influyen en la fabricación de tubos con malas condiciones, encontrando discontinuidades, siendo el más suscitado el de porosidad en el cordón de soldadura.

Por lo que es necesario emplear métodos no destructivos volumétricos como como ultrasonido y de radiografía que permitan la detección de todas aquellas discontinuidades que pueden incurrir en un defecto y comprometan la integridad

física del componente soldado, además que por medio de estas pruebas se puede determinar si la porosidad puede causar daño, ya que si ésta no es excesiva y su tamaño no es relativamente grande, su presencia no es crítica y pueden ser aceptados por los criterios aplicables, debido a que no tiene bordes agudos que pudieran causar concentraciones de esfuerzo.

### **1.5. Aporte tecnológico**

El presente trabajo, pretende mejorar el análisis de las posibles discontinuidades encontradas a través de ensayos no destructivos, permitiendo de esta forma establecer mejores controles de calidad durante la fabricación de tuberías para la conducción de hidrocarburos

### **1.6. Alcance**

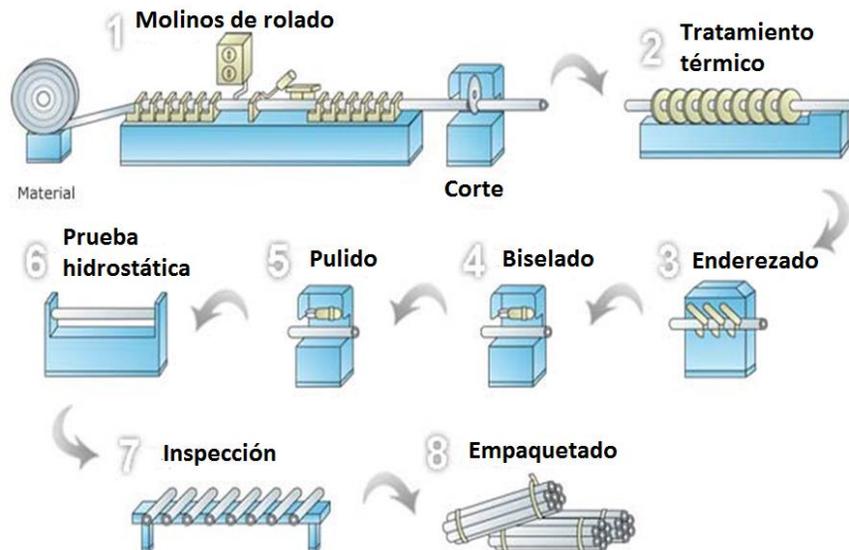
El presente trabajo se limitará a la revisión bibliográfica referente a cuales son los beneficios y limitantes en la detección de discontinuidades más recurrentes, generadas durante la fabricación de tubería de acero API 5L X70 por el proceso de arco sumergido, de los métodos de ensayos no destructivos de ultrasonido y radiografía.

## CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Fabricación de tuberías

La tubería es aquel elemento hueco, que normalmente presenta una forma cilíndrica, abierta por ambos extremos, y se emplea en diferentes ámbitos, ya sea para la conducción de hidrocarburos y agua o como pilote en una construcción.

La fabricación de un componente en forma de tubo requiere de un proceso fabricación empezando por el rolado del material en forma de placa mediante unos molinos para después pasar por diferentes procesos como enderezado, pulidos e inspección del componente hasta terminar con su empaquetamiento y envío, como se muestra en el diagrama de la *Figura 2.1*.



**Figura 2.1** Diagrama en el proceso de fabricación de un tubo.

Un componente de tubería puede estar fabricado a partir de diversos materiales como polímeros y metales, en el cual el más empleado es el acero debido de las propiedades mecánicas que brinda durante la transportación de los hidrocarburos ya que estos están sometidos a presión.

### **2.1.1. Materiales empleados para la fabricación de tuberías**

Debido a que el acero es un material que cuenta con propiedades mecánicas altas de resistencia, tenacidad, dureza y entre otras, es capaz de resistir las presiones a las que el contenido de un tubo viaja por él, por ello es el más utilizado en la fabricación de dicho componente

#### **2.1.1.1 Aceros**

Es el principal producto siderúrgico utilizado en construcciones soldadas, especialmente el 90% son aceros al carbono y el 10% son aceros aleados, por lo que el material más importante usado en la industria es el acero al carbono.

El acero es uno de los materiales más usados en la industria por lo que tiene diversas aplicaciones, dependiendo de las propiedades y características de cada material, una de las más importantes es en la fabricación de tuberías. [1].

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono (y otros elementos de aleación e impurezas) en las que el contenido de carbono varía entre 0.005 y 2.00% como límite teórico, Aunque en la práctica rara vez producen aceros con más de 1.00 % de C. [2].

#### **Clasificación de los aceros**

El carbono es un constituyente muy importante, por su habilidad de aumentar la dureza y la resistencia del acero, el acero se clasifica de acuerdo con los elementos de aleación que contiene. El carbono es el elemento más importante, por cuya razón todos los aceros se clasifican de acuerdo con el contenido de carbono.

Los diferentes tipos de aceros se agrupan en 4 clases principales:

- Aceros al carbono
- Aceros aleados
- Aceros inoxidables
- Aceros grados herramientas. [3].

### **1.- Aceros al carbono**

Los aceros al carbono están siempre en la forma de  $Fe_3C$ , en las que el porcentaje de carbono normalmente no excede el 1 por ciento en peso, con contenidos de Mn de hasta 1.65% y elementos de Cu y Si de hasta 0.6%, otros elementos de aleación normalmente están presentes como impurezas.

Tienen una resistencia a la fatiga elevada, se pueden incrementar éstas por medio de un tratamiento térmico y por aleación. [3].

De acuerdo al porcentaje del carbono se pueden clasificar en:

#### **a) Aceros de bajo carbono**

Son todos los tipos de acero que contienen entre 0.05 y 0.30% de carbono. Son conocidos como aceros dulces o simplemente como hierro dulce. [4].

Los aceros con bajo contenido de carbono se producen primordialmente en láminas, en hojas, o en rollos, laminados tanto en frío como en caliente. Tienen baja resistencia a la fluencia, y se emplean en la mayoría de las aplicaciones que requieren considerable conformación en frío, tales como piezas estampadas. [5].

#### **b) Aceros con contenido medio de carbono**

Son todos los tipos de acero que poseen entre 0.30 y 0.45% de carbono. [4].

La soldadura de estos aceros puede requerir procesos especiales, lo que puede incluir el precalentamiento, el poscalentamiento y el relevado de

esfuerzos. Su dureza puede variar desde totalmente blandos hasta una dureza de 25 Rockwell C. [4].

### **c) Aceros con contenido alto de carbono**

Son todos los tipos de acero que poseen entre 0.45 y 0.90% de carbono. [4].

Presentan una soldabilidad muy mala, pues estos aceros son muy templeables y tienen a formar martensita dura y frágil y después de la soldadura que eleva mucho el riesgo de la fisuración en frío, para evitarlo es necesario precalentar a temperaturas de 200 C y efectuar tratamientos térmicos pos-soldadura, el material de aporte debe de ser de bajo hidrógeno. [3].

## **2.- Aceros Aleados**

Son aquellos en los que el límite especificado de elementos de aleación excede de 1,65 % Mn, 0,60% Si ó 0,60 % Cu, o bien, tienen un intervalo o una cantidad mínima definida de los siguientes elementos: aluminio, columbio, niobio, cromo, níquel, molibdeno, titanio, tungsteno, vanadio o circonio. [2].

### **Tipos de aceros aleados:**

#### **a) Aceros de baja aleación**

La mayoría de éstos se clasifican en uno de los siguientes grupos:

- a) Aceros de alta resistencia y baja aleación (para usos estructurales o para la construcción recipientes a presión)
- b) Aceros para maquinaria y para usos automotriz y aeronáutico
- c) Aceros para servicios a temperaturas elevadas

Aceros para servicios de baja temperatura. [2].

#### **b) Aceros de alta aleación**

Como se mencionó anteriormente, los aceros de alta aleación contienen más de un 10% de contenido total de aleantes, principalmente de cromo, níquel y manganeso.

Dentro de este grupo están clasificados los aceros austeníticos al manganeso, los inoxidables y los resistentes al calor. [2].

En la fabricación de los componentes de Tubacero se emplea un acero API 5L grado X70 en el cual a base de las especificaciones tiene las propiedades y componentes que a continuación se describirá.

### 2.1.1.2 Especificación API 5L para tuberías en línea

El propósito de esta especificación es proporcionar estándares para tubos adecuados para uso en conducción de gas, agua o petróleo, en las industrias petroleras y de gas natural. *La Tabla 2.1* muestra la clasificación API 5L para aceros al carbono, y en la *Tabla 2.2* se muestran las propiedades mecánicas de dicho acero recalcando el acero API X70.

Es aplicable a tubos para líneas, soldados y sin costura. Incluye tubos de línea roscados de peso estándar y de pared extra- gruesa y doble, de los extremos planos especiales y también tubos con extremo en campana y espita y tubos de línea de flujo directo. [1].

En la *Tabla 2.3* se muestra la composición química de tuberías en los diferentes grados según clasificación de la especificación

**Tabla 2.1** Clasificación API 5L para aceros al carbono. [6].

<b>Grado</b>	<b>Símbolo</b>
A25 Clase I	A25
A25 Clase II	A25R
A	A
B	B
X42	X42
X46	X46
X52	X52
X56	X56
X60	X60
X65	X65
<b>X70</b>	<b>X70</b>
X80	X80

**Tabla 2.2** Requerimientos de esfuerzo de tracción de aceros API 5L. [6].

Grado	Esfuerzo mínimo de fluencia		Esfuerzo máximo de fluencia		Mínimo esfuerzo de tracción		Máximo esfuerzo de tracción	
	PSI	MPa	PSI	MPa	PSI	MPa	PSI	MPa
X65	65,000	448	87,000	600	77,000	531	110,000	758
<b>X70</b>	<b>70,000</b>	<b>483</b>	<b>90,000</b>	<b>621</b>	<b>82,000</b>	<b>565</b>	<b>110,000</b>	<b>758</b>
X80	80,000	552	100,000	690	90,000	621	120,000	827

**Tabla 2.3** Composición química de tuberías para PSL 1 de 25 mm (0,984 in). [6].

Grado	C	Mn	P		S	V	Nb	Ti
	Max.	Max.	Min.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.
Tubería Soldada								
X56	0.26	1.40	-	0.03	0.03	D	d	D
X60	0.26	1.40	-	0.03	0.03	F	f	F
X65	0.26	1.45	-	0.03	0.03	F	f	F
<b>X70</b>	<b>0.26</b>	<b>1.65</b>	-	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>F</b>	<b>f</b>	<b>F</b>

c - Salvo otro requerimiento, la suma de los contenidos de Nb y V deberán ser 0,06%.

d - La suma de las concentraciones de Nb, V y Ti será del 0,15%.

f - Salvo otro requerimiento, la suma de las concentraciones de Nb, V y Ti será del 0,15%.

Una de las etapas de mayor importancia durante la fabricación de las tuberías, es el proceso de unión, el cual puede llevarse mediante diferentes métodos o procesos, uno de los más utilizados son los diferentes procesos de soldadura ya sea de arco o por resistencia. En el apartado siguiente se describirá lo que es un proceso de soldadura y así como el proceso empleado en la fabricación de tuberías.

### 2.1.2 La soldadura y su definición

La Sociedad Americana de Soldadura AWS (por sus siglas en inglés) define a una soldadura como el proceso de unión de materiales, que producen coalescencia, calentándolos a una temperatura de soldado con o sin la aplicación de presión, o por medio de aplicación de presión solamente y con o sin uso de material de aporte. [7].

Es el método más eficaz y el único posible de unir dos o más piezas metálicas para hacerlas funcionar como un solo elemento. La soldadura es la

mejor forma de proteger y conservar los materiales, protegiendo su superficie con recubrimientos especiales metálicos. [5].

La unión de la tubería puede llevarse de manera longitudinal o transversal, el uso de la soldadura longitudinal es para la formación de la tubería, mientras que la circunferencial se da para la unión de dos tubos ya elaborados.

### **Soldadura longitudinal**

La tubería con costura longitudinal por arco sumergido (SAWL) es fabricada a partir de una plancha o lámina. Después de ser sometida a inspección por ultrasonido, cada plancha es cortada y biselada en los borde de cada lado, para luego pasar por una prensa (prensa en U) donde obtiene la forma de U. Posteriormente se le da la forma de círculo en otra prensa (prensa de anillo).

Una vez cumplida esta fase la tubería en su presentación de bordes es soldada por el interior mediante el proceso de soldadura por arco sumergido y posteriormente bajo el mismo procedimiento es soldada por la superficie externa. Seguidamente se somete una expansión mecánica que busca acercar esta sección lo más posible a una forma circular uniforme. Cada tramo fabricado de la tubería debe ser luego probado hidrostáticamente y la soldadura debe ser inspeccionada con un equipo ultrasonido para soldaduras.

Entre los aspectos críticos del control de calidad de tuberías fabricadas bajo este proceso están la potencial ovalidad de la sección transversal, y la rectitud de los tramos. [8].

La soldadura longitudinal se puede lograr por medio de diferentes procesos de soldadura, sin embargo el más utilizado en la fabricación de las tuberías es el proceso de arco sumergido debido a su alta producción al ser un proceso automático y otras variables que se describirán a continuación.

#### **2.1.2.1 Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW)**

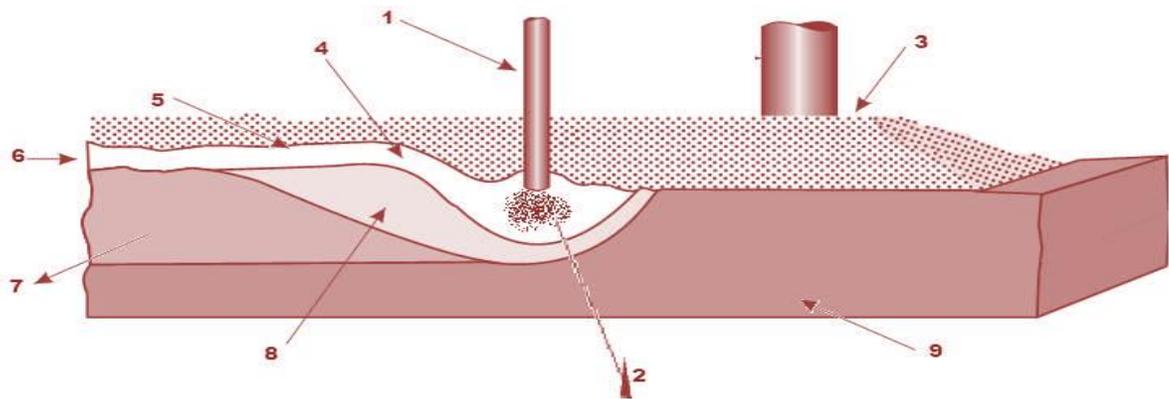
El sistema es totalmente automático y permite obtener grandes rendimientos en producción. Se puede usar también como un proceso semiautomático,

mediante una pistola manual, similar a la que se usa en soldadura de gas inerte o gas activo (MIG MAG) por sus siglas en inglés, pero con diámetros de electrodos mayores (hasta 2,4 mm) y de forma parecida a como en el proceso de MIG se aportaría el fundente en vez del gas de protección. El fundente viene alimentado de una tolva que por efecto de gravedad cubre el arco de soldadura.

El arco eléctrico se establece entre el electrodo metálico y la pieza a soldar. Igual que sucede con los electrodos, pueden utilizarse uno o varios electrodos simultáneamente o bien flejes o bandas.

El fundente protege el arco y el baño de fusión de la atmosfera circundante, de tal manera que ambos permanecen invisibles durante el proceso. [9].

Proceso en el que se emplea uno o más arcos entre el o los electrodos metálicos desnudos y el arco de soldadura. El arco y el metal fundido se protegen por medio de una capa de fundente granular sobre las piezas de trabajo; no se aplica presión y se emplea metal de aporte del electrodo y algunas veces de fuentes adicionales, tales como varilla o metal granulado. En la *Figura 2.2* se muestra de manera esquemática este proceso.



- |                          |                                 |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1- ELECTRODO             | 6- ESCORIA SOLIDA               |
| 2- ARCO                  | 7- METAL DE SOLDADURA SOLIDO    |
| 3- FUNDENTE              | 8- CHARCO DE METAL DE SOLDADURA |
| 4- ESCORIA FUNDIDA       | 9- METAL BASE                   |
| 5- ESCORIA SOLIDIFICANDO |                                 |

**Figura 2.2** Proceso de Soldadura por Arco Sumergido (SAW). [2].

## **Métodos de aplicación del proceso SAW**

### **SAW automática**

En este procedimiento, el electrodo lo suministran una o más cabezas de alimentación, y el fundente es previsto, separadamente, en forma de polvo. La velocidad de alimentación del electrodo es constante, para mantener constante la longitud del arco.

En este proceso, las soldaduras profundas y anchas pueden ser susceptibles de fisuras, debido a tensiones térmicas. La tenacidad de la junta puede resultar afectada, así como en la soldadura por arco metálico protegido SMAW (por sus siglas en inglés) la elección de la varilla y fundente pueden tener efecto en las propiedades y composición de la soldadura. En la soldadura por arco sumergido, las mismas quedan con buen acabado, de forma suave y regular, y carecen de inclusiones y poros. Estos procesos de producción pueden llevarse a cabo con gran rendimiento.

Como otras técnicas, requiere gran cuidado en el almacenaje de las planchas y la preparación de bordes, y debe ser evitada la presencia de humedad u óxido. La raíz se fabrica por otro proceso, SMAW o FCAW, las propiedades de impacto de la soldadura pueden ser inferiores a las obtenidas con el SMAW a causa de la formación de microestructuras de grano grueso, debidas a la formación de soldaduras en simple pasada. [10].

### **Equipo para el proceso SAW**

#### **Fuente de energía**

Como es un proceso que puede ser semiautomático o automático requiere de una fuente de energía de corrientes elevadas con un ciclo de trabajo del 100% de voltaje constante aunque también se puede utilizar fuentes de corrientes constantes, se pueden utilizar también máquinas de corriente alterna. En la *Figura 2.3* se muestra el equipo de soldadura para SAW.

## **Cabezal y antorcha de soldadura**

Comprende la unidad de motor alimentador y los rodillos impulsores del electrodo, la antorcha, el tubo de contacto y accesorios para montar y posicionar el cabezal. Casi siempre se monta una boquilla de fundente en el cabezal de soldadura, con el fin de depositar el fundente un poco más adelante del alambre de soldadura o en forma concéntrico a su alrededor.

## **Alimentador del alambre**

Es un dispositivo que alimenta constantemente el electrodo extraído de una bobina, cuenta con un motor eléctrico el cual brinda fuerza motriz para impulsar una caja de engranes embragados los cuales conducen al electrodo a través del tubo de contacto hacia la pieza de trabajo, el equipo puede contar con un enderezador de alambre que puede facilitar el desplazamiento del electrodo por la caja de engranes. Los motores de alimentación del electrodo por lo regular son del tipo de imán permanente, y alimentan el electrodo a velocidades de 8 a 235 mm/seg.

## **Tubo de contacto**

Permite un buen contacto eléctrico entre la fuente de energía y el electrodo alimentado constantemente, está fabricado generalmente de cobre por ser un excelente conductor de electricidad, sirve además como guía del electrodo.

## **Tobera de alimentación del fundente**

El fundente es alimentado desde una tolva colocada en el equipo de soldadura, por efecto de gravedad el fundente es desplazado hasta la tobera de alimentación, la cual se encuentra muy cerca del tubo de contacto, lo que permite formar una cama de fundente entre la pieza de trabajo y la tobera, por el interior de la cama de fundente quedando protegido

## **Dispositivo para la recolección de fundente**

El fundente que no es fundido queda como en su estado original, que puede ser utilizado nuevamente, algunos equipos cuentan con dispositivos que recolectan el fundente donde recibe un tratamiento de limpieza extra para un

posterior uso. Estos dispositivos pueden retirar el fundente no fusionado y la escoria fusionada de detrás de la soldadura, separar con mallas la escoria fusionada y otros materiales de gran tamaño, eliminar partículas magnéticas, eliminar polvos finos, ciclar el fundente a una tolva, calentar el fundente para mantenerlo seco.

### Dispositivo de avance

El equipo con que se cuenta, se encuentra montado sobre un riel en el cual se desplaza el equipo de soldadura, que es impulsado por medio de motores eléctricos en el que se regula la velocidad de avance antes de comenzar la soldadura. [3].

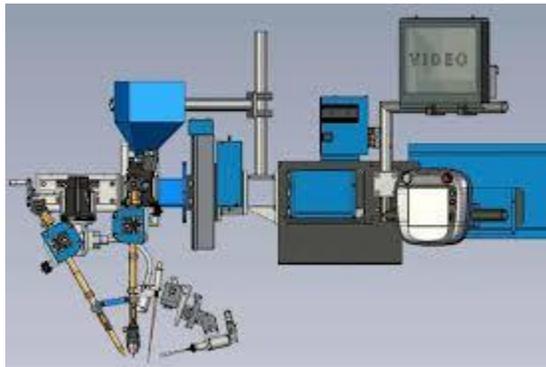


Figura 2.3 Equipo de soldadura SAW. [3]

### Polaridad y corrientes para el proceso SAW

El proceso SAW puede utilizar corriente alterna o continua. Lo más usual es trabajar con una fuente de corriente regulada en voltaje constante y con el electrodo consumible en polaridad positiva. En la *Tabla 2.4* hay una tabulación de la regulación de parámetros para la soldadura en aceros de mediana y baja aleación

El factor de aporte es mayor conectando el electrodo al polo negativo, pero la penetración que se consigue es menor. Este efecto se utiliza fundamentalmente en la soldadura de recargue, para evitar una excesiva penetración en el metal de base, que en la mayoría de las ocasiones no es deseable por razones metalúrgicas. [9].

**Tabla 2.4** Tabulación de la regulación de parámetros para la soldadura en aceros de mediana y baja aleación. [11].

<b>Espesor del material (mm)</b>	<b>Diámetro del electrodo (Pulg)</b>	<b>Diámetro del electrodo (mm)</b>	<b>Amperaje</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Velocidad de avance (m/min)</b>
4	3/32	2.4	375	30	1
5	3/32	2.4	425	35	1
6	1/8	3.2	480	35	0.90
7	1/8	3.2	550	30	0.88
8	5/32	4.0	550	35	0.90
10	5/32	4.0	600	35	0.90
12	3/16	4.8	750	35	0.80
16	3/16	4.8	800	36	0.55
20	3/16	4.8	925	38	0.45
25	¼	6.4	925	36	0.45
30	¼	6.4	925	36	0.35
35	¼	6.4	1000	34	0.28

## **Electrodos y fundentes aplicables en el proceso de soldadura SAW**

### **Electrodos**

En el sistema de Soldadura por arco sumergido, se utiliza un electrodo también conocido como alambre sólido, recubierto por una fina capa decobrizado para evitar su oxidación y mejorar el contacto eléctrico. Generalmente contiene elementos desoxidantes, que junto a los que aporta el fundente, limpian las impurezas provenientes del metal base o de la atmósfera y aportan elementos de aleación seleccionados según sean las características químicas y mecánicas del cordón de soldadura que se desee.

### **Clasificación de los electrodos**

Según la AWS, los electrodos se clasifican por 2 letras y 2 números, que indican la composición química de éstos. EX XX letras y dígitos:

1° letra, "E": Significa electrodo para soldadura al arco.

2° letra, "X": Significa el contenido máximo de manganeso:

L: 0,60% Mn máx. (Bajo contenido manganeso).

M: 1,25% Mn máx. (Contenido mediano de manganeso).

H: 2,25% Mn máx. (Alto contenido de manganeso).

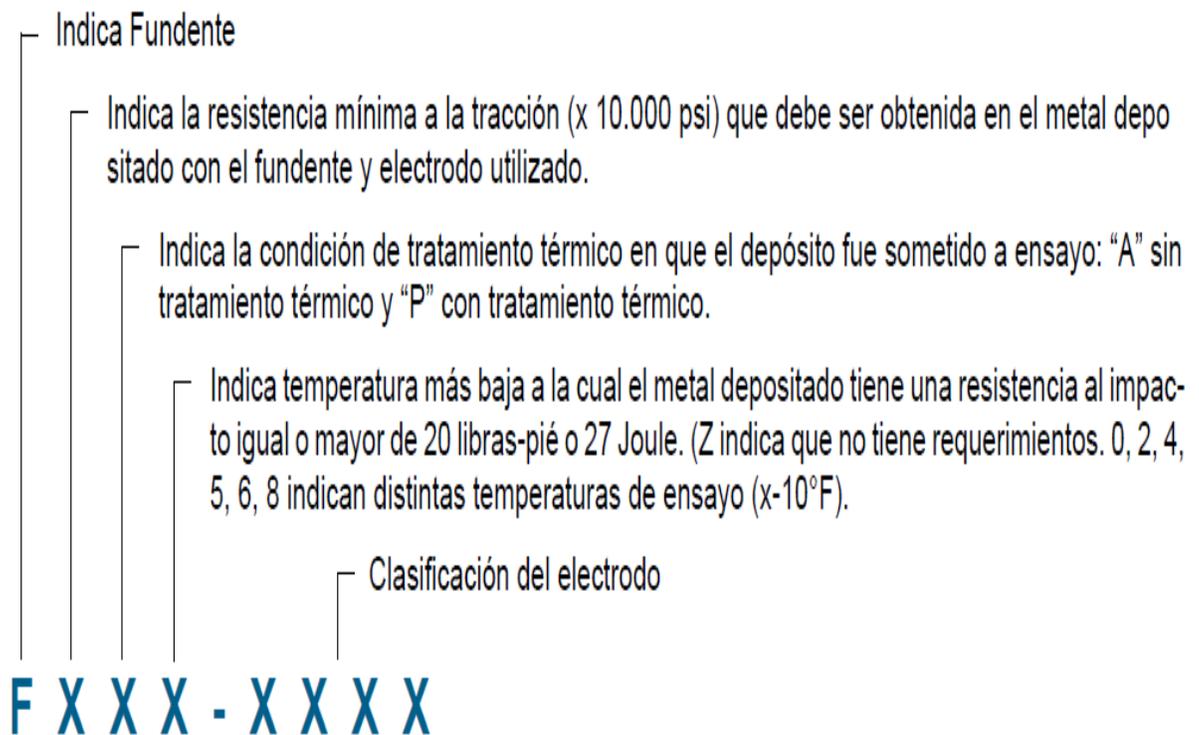
Los 2 últimos dígitos: Indican los porcentajes medio de carbono.

Los electrodos se entregan en rollos de 25 aproximadamente y con diámetro interior de 300 mm. Se ofrecen en los siguientes diámetros: 5/64"; 3/32"; 7/64"; 1/8"; 5/32"; 3/16" y 1/4", como se muestra en la *Figura 2.4*. [11].



**Figura 2.4** Electrodo (alambre) para soldadura SAW de 1/4". [11].

La clasificación de los **fundentes** es la mostrada en la *Figura 2.5*.



**Figura 2.5** Clasificación de los fundentes según la norma AWS. [11].

Los fundentes que se emplean en arco sumergido son mezclas fusibles de minerales granulados y otros compuestos químicos de composición complejas y variadas. La composición de estos, su tamaño y distribución de grano, su punto de fusión y la viscosidad y la actividad química de las escorias que forman influyen grandemente en la forma de los depósitos de soldadura y el perfil y acabado de los cordones. [12].

La clasificación anterior se basa en normas, códigos y especificaciones para el proceso de arco sumergido. Las normas AWS que establecen los requisitos que deben cumplir los consumibles que se emplean para SAW se indican a continuación:

- ANSI/AWS A5.17 para electrodos y fundentes de acero al carbono.
- ANSI/AWS A5.23 para electrodos y fundentes de acero de baja aleación.

### **Ventajas y limitaciones del proceso SAW**

Las principales ventajas y limitaciones asociadas con este proceso se indican a continuación:

#### **Ventajas**

- Alta penetración en las juntas cuando se suelda con corriente directa y el electrodo positivo.
- Debido a la alta penetración, pueden soldarse a tope y con ranura cuadrada, placas de acero de espesores hasta de 13 mm (1/2") con un solo paso y con electrodo sencillo, y hasta de 19 mm (3/4") soldando por los dos lados.
- Aunque se emplean intensidades de corrientes elevadas, debido a que también las velocidades involucradas son altas y parte del calor se emplea para fundir el fundente, el calor aportado y la distorsión resultan relativamente moderados.
- Requiere poco entrenamiento y habilidad manual por parte del soldador y del operador.

- Permite obtener cordones de muy buena apariencia y de perfiles y tamaños uniformes.

### **Limitaciones**

- Prácticamente está limitado a la posición plana y para filetes en posición horizontal.
- El equipo es relativamente costoso.
- El uso de fundentes activos y aleados requieren que los procedimientos de soldadura sean rigurosamente controlados, ya que variaciones pequeñas en el voltaje, el amperaje o la velocidad, pueden provocar cambios grandes en la composición química y en las propiedades mecánicas del metal depositado.
- En soldaduras de pasos múltiples es necesario remover la escoria a fin de evitar inclusiones. [2].

Durante el proceso de fabricación de tuberías pueden surgir diferentes discontinuidades a causa de parámetros erróneos, materiales o procesos inadecuados así como la calidad del operador o soldador. La discontinuidad que se presenta en una soldadura por proceso de arco sumergido es la conocida como porosidad, a causar de mala limpieza o protección deficiente del arco de soldadura.

En apartado siguiente se realiza la descripción y ejemplificación gráfica de las discontinuidades más comunes presentes en soldaduras por arco sumergido, y cuando una discontinuidad logra pasar a ser un defecto.

## **2.2. Discontinuidades posibles en la soldadura**

### **Discontinuidades**

El término discontinuidad se utiliza para describir cualquier variación local en la discontinuidad de los materiales incluyendo cambios geométricos, agujeros, cavidades, grietas, estructuras, composición o propiedades, en otras palabras, las discontinuidades son pérdida de homogeneidad del material.

Las discontinuidades son imperfecciones adentro o por un lado de la soldadura, que pueden dependiendo de su tamaño y ubicación disminuir la resistencia para la cual fue diseñada la soldadura. [13].

Las causas que pueden originar estas imperfecciones son, entre otras, una inadecuada:

- Preparación, disposición o limpieza de las piezas a unir.
- Ejecución de la soldadura.
- Soldabilidad del material base.
- Elección de los consumibles (gases, metal de aporte). [14].

### **Defecto**

Se considera defecto toda aquella discontinuidad en el que sus requerimientos o criterios de aceptación, en base a su evaluación son rechazados. Cuando cualquier discontinuidad, única o múltiple, es de tal tamaño, forma, tipo y situación que crea una posibilidad substancial de fallo durante el servicio se la denomina defecto. [14].

Por definición, un defecto es una condición que debe ser removida o corregida. La palabra “defecto” debería ser cuidadosamente usada, ya que implica que la soldadura es defectuosa y requiere medidas correctas o su rechazo de este modo, algunas reparaciones pueden ser hechas innecesariamente sin un criterio de ingeniería válido que las sostenga. [15].

### **Diferencia entre discontinuidad y un defecto**

En ensayos no destructivos se escucha hablar de “defectos” y/o “discontinuidades”. De acuerdo a las definiciones dadas, una indicación encontrada es llamada discontinuidad hasta que se pueda identificar y evaluar el efecto que puede tener sobre la pieza en servicio. Sí, de acuerdo a esto, la discontinuidad es inaceptable con arreglo a un criterio de especificaciones, será entonces un defecto, ahora, sí esa discontinuidad no afecta el rendimiento de la pieza en el servicio al que se destina, es decir los criterios de aceptación son lo suficientemente buenos, se deberá de llamar simplemente una discontinuidad.

De esto se reduce que un defecto siempre es una discontinuidad pero no siempre una discontinuidad es un defecto. [16].

### **Clasificación de los tipos de discontinuidades**

Desde un punto de vista general, las discontinuidades de la soldadura y metal base pueden clasificarse en los cuatro grupos siguientes:

- Discontinuidades de las juntas soldadas (metal de soldadura y zona afectada térmicamente).
- Imperfecciones y discontinuidades relacionadas con requisitos sobre dimensiones.
- Discontinuidades relacionadas con las propiedades y estructura de las juntas soldadas.
- Discontinuidades de los metales base. [2].

Una discontinuidad puede producirse en cualquier momento de la vida de una pieza metálica. Si la misma se crea durante la producción inicial desde el estado de fusión, se denomina discontinuidad inherente. Si se produce durante los procesos posteriores de fabricación o terminado, entonces se denomina discontinuidad de proceso. Finalmente pueden producirse también discontinuidades durante el uso del producto debido bien a circunstancias ambientales o de carga, o ambas, en cuyo caso se denominan discontinuidades por servicio.

### **Discontinuidades inherentes**

Surgen a través de la fase crítica de vertido y solidificación

- Colada
- De fundición
- Cerrado o solapado en frío

### **Discontinuidades de proceso**

Los procesos de manufactura pueden producir, en los materiales, discontinuidades adicionales u ocultar fallas inherentes a los mismos.



## 1.- Porosidad

Cavidad o cavidades formadas por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura o en un depósito aplicado por rociado térmico, tienen forma más o menos esférica pueden ser alargados

De acuerdo a la localización la forma en que se presentan los poros, éstos pueden clasificarse del siguiente modo:

### a) Porosidad distribuida uniformemente

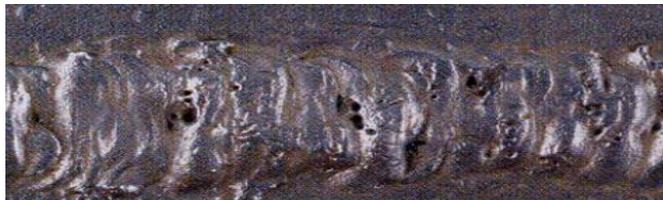
Porosidad esparcida de manera uniforme en el metal de soldadura; también se le llama porosidad distribuida al azar, tal como se muestra en la *Figura 2.6*.

#### Causas probables:

- Técnicas de soldadura inadecuada.
- Preparación incorrecta de las juntas o errores en el manejo de los materiales.

#### Prevención:

- Manejo adecuado de los materiales.
- Técnicas correctas de soldadura y de preparación de juntas.
- Si la soldadura se enfría con suficiente lentitud para permitir que los gases alcancen la superficie antes de la solidificación, se minimizara la porosidad. [2].



**Figura 2.6** Porosidad distribuida uniformemente en la soldadura. [19.]

### b) Porosidad agrupada

Grupos localizados de poros separados por longitudes considerables de un metal de soldadura sano, mostrado en la *Figura 2.7*.

**Causas probables:**

- Iniciación o terminación inadecuada del paso de soldadura.
- Soplo de arco.

**Prevención:**

- El soplo de arco se puede evitar o disminuir al reducir la intensidad de la corriente directa.
- Soldando con corriente alterna, mediante la disminución de la longitud del arco, cambiando la conexión del cable al otro extremo de la pieza de trabajo o haciendo conexiones en varios puntos. [2].



**Figura 2.7** Un tipo de discontinuidad de poros agrupados. [19].

**c) Porosidad alineada**

Es una serie de poros alineados que siguen una trayectoria recta o más o menos recta, frecuentemente a lo largo de los límites del metal de soldadura con el metal base como se indica en la *Figura 2.8*, los límites entre cordones o cerca de la raíz de la soldadura.

**Causas probables:**

- Contaminación que reacciona químicamente y genera gases en zonas contaminadas.
- soplo de arco. [2].



**Figura 2.8** Discontinuidad tipo poros alineados. [19].

## 2.- Socavados

Es una ranura dentro del metal base, adyacente al pie o la raíz de la soldadura como se muestra en la *Figura 2.9*. Tal ranura se forma debido a la fusión del metal base, y no es llenada por el metal de soldadura.

Esta ranura reduce el espesor del metal base y por lo tanto, la resistencia de la junta, particularmente con respecto a los esfuerzos de fatiga; también crea una muesca que actúa como un concentrador de esfuerzos.

### Causas probables:

- Corriente excesiva de soldadura y longitud de arco (voltaje) muy alto,
- Técnica incorrecta del soldado (manipulación inadecuada del electrodo y velocidad excesiva de desplazamiento).
- Posición de trabajo incomoda, falta de acceso a la junta y soplo de arco. [2].

### Prevención

- Usar deposición del metal de aporte uniforme en las soldaduras de tope.
- Usar electrodo adecuado.
- Evitar un depósito de soldadura exagerado.
- Usar corriente moderada y soldar lentamente.
- Sostener el electrodo a una distancia prudente del plano vertical al soldar filetes horizontales. [11].



**Figura 2.9** Discontinuidad tipo socavado. [2].

## 3.- Escoria atrapada

Residuos de revestimiento del electrodo o del fundente, que han fundido y solidificado en la soldadura. Pueden presentarse de forma aislada, alineada o agrupada. [14].

Una vez que se forma la escoria, debido a que tiene un peso específico menor que el metal, tiende a subir a la superficie de este, pero si existen ranuras agudas en los bordes a unir del metal base, la escoria puede quedar atrapada mecánicamente como en la *Figura 2.10*.

#### **Causas probables:**

- Técnicas erróneas de soldadura.
- Mal diseño de las juntas o preparación incorrecta de estas.
- Falta de limpieza de los bordes a soldar.
- Acceso restringido para soldar la junta, bordes y ranuras agudos entre metal base y de soldadura o entre cordones y,
- Con frecuencia, limpieza deficiente entre pasos.

#### **Prevención:**

- Preparar adecuadamente las juntas antes de depositar cada cordón.
- Disminuir la velocidad de solidificación del metal fundido,
- No soldar a temperaturas demasiado bajas,
- Tener el cuidado de corregir los contornos que pudieran dificultar el acceso completo del arco.
- Evitar ángulos de ranura muy cerrados y asegurar la remoción completa de escoria antes de depositar el siguiente paso. [2].



**Figura 2.10** Escoria atrapada en la soldadura. [19].

#### **4.- Grietas**

Son el efecto de una rotura local incompleta. Pueden ser paralelas al cordón de soldadura, denominándose longitudinales, o pueden ser perpendiculares a éste, denominándose transversales. También pueden aparecer en grupo en forma de estrella.

Ningún código de diseño admite este tipo de defecto, ya que cuando la construcción soldada se someta a la carga para la que ha sido diseñada la grieta crecerá y provocará su rotura catastrófica.

Las grietas pueden estar localizadas en:

- El metal base.
- La zona afectada térmicamente.
- La zona de unión entre la zona afectada térmicamente y cordón de soldadura, es decir en el acuerdo de la soldadura.
- El cordón de soldadura.
- El cráter de soldadura. [14].

Se caracterizan por sus puntas agudas y la alta relación de su longitud con respecto de su ancho.

Las grietas ocurren en los metales de soldadura y base cuando los esfuerzos localizados exceden la resistencia última del material, y también por la temperatura a la que se desarrollan; desde este punto de vista se agrupan en grietas en caliente y grietas en frío. Los tipos de grietas son:

#### **a) Las grietas en frío**

Se desarrollan después de que ha concluido el proceso de solidificación y normalmente están asociadas con la fragilización por hidrógeno.

#### **b) Las grietas en caliente**

Se desarrollan a altas temperaturas, durante el proceso de solidificación o a temperaturas cercanas al punto de fusión. Frecuentemente se originan en sitios de solidificación preferencial de aleantes a temperaturas cercanas al punto de fusión y se propagan entre los granos.

#### **c) Grietas longitudinales**

Son aquellas paralelas al eje de la soldadura como se muestra en la *Figura 2.11*, ya sea que estén en la línea de centro del metal de soldadura o bien, en el pie de esta, en la zona térmicamente afectada del metal base. [2].

### **Causas posibles de grietas longitudinales**

- Frecuentemente son originadas por altas velocidades de enfriamiento y condiciones severas de sujeción o restricción.
- En soldaduras de gran longitud depositadas mecanizada o automáticamente, este tipo de grietas está asociado con altas velocidades de soldadura y algunas veces con porosidad que no aflora a la superficie.

### **d) Grietas transversales**

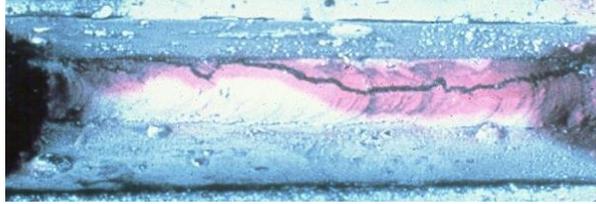
Son grietas perpendiculares al eje de la soldadura, pueden localizadas exclusivamente en el metal de soldadura o pueden propagarse de este a la zona afectada térmicamente y aun dentro del metal base. En algunos casos las grietas transversales se forman solo en la zona afectada térmicamente y no en la soldadura. [2].

### **Causas probables de grietas transversales**

- Estas grietas se deben principalmente a esfuerzos de contracción longitudinales que actúan sobre el metal de soldadura de baja ductilidad y juntas que tiene un alto grado de sujeción o restricción. [2].

### **Prevenciones generales para las grietas**

- Modificar el proceso de soldeo para reducir las tensiones debidas al efecto térmico.
- Ajustar los parámetros para trabajar con una relación profundidad/ancho 1:1.
- Limpiar las superficies, eliminando muy especialmente los lubricantes de corte.
- Mejorar el ajuste de las chapas en la unión.
- Utilizar una técnica de interrupción del arco adecuada
- Utilizar las precauciones necesarias para el soldeo de ese material. No soldar
- Evitar enfriamientos rápidos, naturales o provocados. [14].



**Figura 2.11** Grieta longitudinal en la soldadura. [19].

## 5.- Fusión incompleta

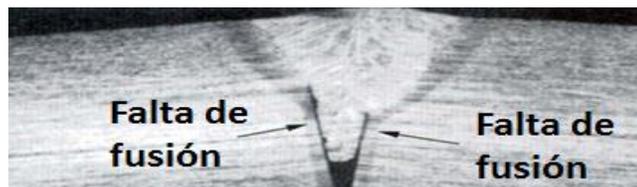
Falta de unión entre el metal de soldadura y las caras del metal base o la superficie de otros cordones en las que no ocurrió la fusión. Esta discontinuidad es también conocida con el término no estandarizado de falta de fusión, *Figura 2.12*.

### Causas Probables:

- Calor de soldadura insuficiente (baja intensidad de corriente o alta velocidad),
- Falta de acceso a todas las caras de fusión.
- Capas de óxido adheridas al metal base.
- Manipulación inapropiada del electrodo.

### Prevención:

- Emplear corrientes y velocidades de soldadura adecuadas.
- Remover óxidos y otros contaminantes de las superficies a unir y asegurar diseños y preparación de juntas que permitan el acceso a todas superficies de fusión. [2].



**Figura 2.12** Falta de fusión en la soldadura. [19].

## 6.- Penetración incompleta

Es una condición de la raíz de la junta de las soldaduras de ranura en la cual el metal de soldadura no se extiende a través de todo el espesor de la junta. Esta discontinuidad también es conocida con el término no estandarizado de “falta de penetración”, ver *Figura 2.13*.

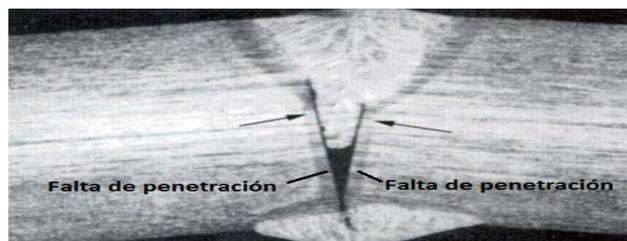
Las soldaduras aplicadas en tuberías son especialmente susceptibles a este tipo de discontinuidad, ya que generalmente el interior de los tubos es inaccesible.

### Causas probables:

- Calor de soldadura insuficiente.
- Diseño inadecuado de la junta.
- Tamaño excesivo de la cara de raíz, abertura de raíz muy pequeña
- Uso de electrodos de diámetro demasiado grande con respecto al diseño de la junta.
- Corriente de soldadura insuficiente.
- Control lateral inadecuado del arco y óxidos o impurezas en las superficies a ser soldadas, particularmente en la cara de la raíz.

### Prevención:

- Usar diseños de la junta adecuados.
- Electrodos del diámetro apropiado y con la intensidad de corriente correcta.
- Condiciones de operación que proporcionen el calor de soldadura adecuado. Ejercer un buen control lateral del arco y eliminar los óxidos y otras impurezas de las superficies a soldar.



**Figura 2.13** Discontinuidad tipo falta de penetración. [19].

## 7.- Traslape

Es la protuberancia del metal depositado que se extiende más allá del pie o la raíz de la soldadura. Es una discontinuidad superficial que constituye una muesca mecánica que actúa como concentrador de esfuerzos como se muestra en la *Figura 2.14*, y casi siempre se considera rechazable.

### Causas probables:

- Control insuficiente de las operaciones de soldadura: oscilación excesiva del electrodo, velocidad de avance lenta asociada con corriente alta.
- Posición de soldadura incorrecta (por ejemplo, soldaduras de filete de tamaño relativamente grande depositadas con cordón sencillo en posición horizontal o vertical).
- Selección inapropiada de los consumibles de soldadura.
- Preparación inapropiada de la junta y óxidos firmemente adheridos al metal base, mismos que pueden interferir con la fusión.

### Prevención

- Velocidad de avance de soldadura moderada.
- Control de corrientes y amperajes.



**Figura 2.14** Discontinuidad tipo traslape. [19].

J. G. Young, J. M. Coffey con colaboración de R. F. Lumb en el año actual desarrollaron investigaciones sobre la importancia de los defectos en soldadura, indicando claramente que los defectos importantes para detectar, identificar y evaluar el tamaño son los de grietas, falta de fusión y penetración incompleta plana y que los defectos tridimensionales tales como inclusiones de escoria y

porosidad son relativamente de menor importancia y, a menudo puede ser ignorados, siempre y cuando no sobre pasen los límites de aceptación.

Además, en su trabajo llegó a la conclusión de que en la mayoría de las situaciones la importante dimensión de un defecto sub superficial es su altura en la dirección a través del espesor en lugar de su longitud. [17].

La formación de discontinuidades se puede prevenir cuando se lleva un correcto control de fabricación de las tuberías, ya que una de las principales causas de formación de discontinuidades es una mala inspección de soldadura debido a un mal manejo de materiales, una incorrecta selección de procesos y de parámetros o un soldador u operador no calificado. Una correcta inspección de soldadura debe estar hecha en sus 3 etapas las cuales se describirán a continuación.

## **2.3. Inspección de soldadura**

### **2.3.1. Importancia de la inspección de soldadura**

El propósito de la inspección de soldadura es determinar si las conexiones soldadas satisfacen los criterios de aceptación de un código o norma específico, o los de algún otro documento.

Por lo general se requiere que la inspección sea completa en los equipos o partes para servicio crítico, los cuales tiene especificados los requisitos de calidad más altos; para juntas críticas por lo común se especifica inspección visual conjuntamente con uno o más métodos de examen no destructivo, la inspección a realizar también debe tomar en cuenta y ser compatible con los requisitos, objetivos y procedimientos del sistema de calidad implementado por las organizaciones involucradas en un trabajo de código.

De acuerdo con lo publicado en el año actual por el investigador J.G. Young, expuso las razones principales para el uso de los ensayos no destructivos resaltando que la primera razón importante es para supervisar y controlar la calidad de la fabricación de la soldadura ya que presencia de ciertos tipos de

defecto es indicativa de un control inadecuado de material o de la selección del procedimiento de soldadura o la ejecución pobre del soldador. Los defectos detectados en una etapa temprana en la fabricación pueden dar lugar a una acción correctiva inmediata

Y la segunda razón de igual importancia es para evaluar la aptitud para el uso y para asegurar que el fracaso no se producirá a partir de un fallo de soldadura dentro de la vida de diseño de la fabricación, ya que ciertos defectos de tipos y tamaños característicos que no son detectados a tiempo provocan la pérdida total del elemento ya sea con el paso del tiempo o uso. [17].

### **2.3.2. Ciclos para la inspección de soldadura.**

En general, la inspección debe realizarse en tres etapas de producción o construcción bien definidas según la AWS: antes de la soldadura, durante y después de esta, esto para lograr una calidad en los componentes.

#### **Inspección antes de la soldadura**

- Revisar los dibujos, normas y contratos aplicables.
- Identificar planes de fabricación y calidad (inspección y pruebas).
- Establecer puntos de verificación en los que debe realizarse un examen o prueba antes de que continúe la fabricación.
- Verificar que están disponibles y calificadas las especificaciones de procedimiento de soldadura necesarias.
- Asegurar que el personal de soldadura está disponible y calificado
- Revisar que los metales base cumplan con las especificación aplicable, están identificados, no representan defectos y que son almacenados y manejados de manera que se asegure que no se deterioren.
- Asegurar que los metales de soldadura (electrodos, metales de aporte, gases, fundentes) especificados están disponibles y que existen las provisiones para almacenarlos y manejarlos de manera correcta
- Verificar que el ajuste y la alineación de los miembros de las juntas a soldar es el requerido por el diseño o procedimiento de soldadura.

- Verificar la disponibilidad del equipo de soldadura necesario y su adecuación para aplicar los procedimientos.
- Asegurar la disponibilidad de los procedimientos y secuencias de soldadura apropiados para minimizar la contracción y la distorsión (cuando esto resulte aplicable).

### **Inspección durante la soldadura**

Las actividades que deben realizarse durante esta etapa son:

- En términos generales, asegurar que las operaciones de soldadura se lleven a cabo conforme a lo establecido por los procedimientos aplicables (tipo, tamaño de los electrodos; voltaje, amperaje y velocidad de soldadura; tipo de corriente y polaridad; tipo y flujo de los gases de protección).
- Verificar que la temperatura de precalentamiento y la temperatura entre pasos son las especificadas por el procedimiento de soldadura, y que se dispone de los medios para el control de estas
- En aplicaciones en las que es un requisito el control del calor aportado por paso, asegurarse de que este control sea efectivo.
- Asegurar que los materiales de soldadura se manejan y almacenan apropiadamente.
- Verificar la calidad del paso de raíz, este paso es un parte críticas de las soldaduras.
- En soldaduras de ranuras soldadas por los dos lados, asegurar de que antes de que suelde el segundo lado, se prepara adecuadamente la raíz de la junta.
- Verificar que la limpieza inicial, entre paso y el final es la adecuada.
- Inspeccionar visualmente las capas o pasos subsecuentes.
- Verificar la realización y los resultados de los exámenes no destructivos en proceso especificados.

## **Inspección después de la soldadura**

- Examinar la apariencia final de las soldaduras
- Medir el tamaño final de las soldaduras
- Determinar la longitud de las soldaduras. Verificar las actividades de reparación.
- Asegurar que las estructuras completas (o las uniones soldadas, según sea aplicable) se sometan al tratamiento térmico posterior a la soldadura (revelado de esfuerzos la mayor parte de las veces) especificado
- Asegurar que se llevan a cabo las pruebas (destruictivas, no destruictivas, hidrostáticas, etc.) especificadas y sus resultados cumplen con los criterios de aceptación.
- Recopilar, distribuir y archivar la documentación (reportes, certificados y registros) de fabricación e inspección requerida
- En términos generales, verificar el cumplimiento de las partes fabricadas con respecto a las normas y dibujos.

La inspección de soldadura puede apoyarse de pruebas no destruictivas para conocer la calidad del componente, estas técnicas se aplican en función de los resultados que se pretender obtener, del material a inspeccionar, así como el tipo de unión y sensibilidad de las mismas para interpretación de resultados.

## **2.4. Pruebas no destruictivas**

Los ensayos no destruictivos (END) son disciplinas tecnológicas que reúnen una serie de métodos que permiten obtener una información sobre las propiedades, estructuras y condiciones de un material o componente, sin modificar su aptitud para el servicio. [18].

El propósito de estos ensayos es:

- Detectar discontinuidades superficiales e internas en materiales, soldaduras, componentes e partes fabricadas.
- Determinar la ubicación, orientación, forma y tamaño el tipo de discontinuidad.

- Establecer la calidad del material, basándose en el estudio de los resultados y en la severidad de las discontinuidades, de acuerdo a las normas de calidad y los objetivos del diseño. [19].

Para el año 2010 Edward Mendoza en colaboración de Luz Quintero y Gerardo Santos, realizaron estudios sobre los diversos métodos para la inspección de tuberías mediante ensayos no destructivos donde concluyeron que los END facilitan la inspección de soldadura proporcionando mejores resultados, pero para ella se requieren de diversas pruebas en una solo inspección ya que éstas pueden variar de acuerdo a sus ventajas y limitaciones en su uso para la detección de discontinuidades superficiales de la tubería. [20].

### **Clasificación**

Los métodos de examen no destructivo que se utilizan en la actualidad se clasifican en base a su modo de operación, capacidad de detección, sensibilidad, y materiales a emplear, los END comunes son los siguientes:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT).
- Radiografía (RT).
- Ultrasonido (UT).
- Electromagnetismo (Corrientes parasitas o Corrientes de Eddy) (ET).
- Detección de fugas (LT).
- Radiografía neutrónica (NRT).
- Emisión acústica (AET).
- Análisis de vibraciones (VA).
- Pruebas térmicas e infrarrojas (TIR).
- Métodos de prueba con Laser.

Los ensayos no destructivos que se emplean en este estudio son los de UT y radiografía debido al alcance de inspección que estos pueden tener durante su aplicación, detectando discontinuidades subsuperficiales y superficiales.

En la *Tabla 2.6* se muestran los ensayos no destructivos aplicados para la detección de los defectos más comunes en la soldadura, resaltando que ultrasonidos y rayos “X” predominan para la inspección.

**Tabla 2.6** Métodos de END aplicables en la detección de algunas soldaduras.

Discontinuidad o tipo de junta	Aplicabilidad de varios métodos de END		
	Aplicables	Aplicables * marginalmente	No aplicable
<b>Porosidad</b>	RT, PT(1), VT(1)	UT, MT(2), ET	
<b>Inclusión de escoria</b>	RT, UT	MT(2), ET	VT, PT
<b>Fusión incompleta</b>	UT	RT, MT(2), ET	VT, PT
<b>Penetración</b>	RT, UT	MT, ET	VT, PT
<b>incompleta en la junta</b>			
<b>Socavado</b>	RT, VT	UT, PT, MT, ET	
<b>Traslape</b>	PT, MT UT,	UT, VT, ET RT	RT
<b>Grietas</b>	PT(1),MT(2), VT, ET		
<b>Junta a tope</b>	RT, UT, PT,	MT, VT, ET	
<b>Junta en traslape</b>	PT, MT, VT	RT, UT, ET	

\*La confiabilidad de los resultados dependen del tamaño, orientación y localización de la discontinuidad y del espesor, entre otros factores.

(1) superficiales.

(2) superficiales y sub-superficiales.

(3) al preparar las juntas a soldar, durante el depósito de un cordón de soldadura y otro en soldadura de pasos múltiples o en los bordes del metal base. [2].

### 2.4.1. Ensayo no destructivo por ultrasonido

La inspección ultrasónica es un método no destructivo en el que se introducen un haz de ondas de sonido de alta frecuencia para la detección de los defectos superficiales y subsuperficiales en los materiales.

Las ondas de sonido viajan a través del material acompañado con algo de pérdida de energía (atenuación) y es reflejada en las interfaces. El haz reflejado

es desplazado y luego analizado para definir la presencia y la ubicación de los defectos o discontinuidades.

El grado de reflexión depende del estado físico de los materiales que forman la interfaz y en menor medida en las propiedades físicas específicas del material. Las ondas sonoras se reflejan casi por completo en las interfaces de metal / gas. La reflexión parcial se produce en interfaces de metal/líquido o metal/sólido.

Las grietas, laminaciones, rechupes, ráfagas, escamas, poros, falta de adherencia, Inclusiones y otras faltas de homogeneidad pueden ser fácilmente detectados.

La mayoría de los instrumentos de inspección ultrasónicos detectan defectos mediante el control de uno o más de los siguientes modos:

- La reflexión del sonido de las interfaces consistentes en los límites de los materiales o discontinuidades en el propio metal
- Tiempo de tránsito de una onda de sonido a través de la pieza de prueba desde el punto de entrada en el transductor al punto de salida en el transductor
- La atenuación de las ondas de sonido por absorción y dispersión dentro de la pieza de prueba más
- Funciones de la respuesta espectral de cada uno transmitido o una señal reflejada. [21].

#### **2.4.1.1. Principio y descripción de la técnica**

La detección, localización y evaluación de las discontinuidades es posible debido a dos hechos: la velocidad del sonido a través de un metal es casi constante, por lo que pueden medirse las distancias recorridas; la amplitud de los pulsos de sonidos reflejados es más o menos proporcional al tamaño del reflector.

Las frecuencias útiles para la inspección oscilan entre 0.25 y 25 Mega Hertzio, y las empleadas para examinar soldaduras varían de 1 a 6 MHz, aunque la mayoría de las inspecciones se realiza con frecuencias aproximadas de 2.25 MHz.

El ultrasonido es generado a través de materiales transductores como el cuarzo o el titanito de bario, que transforman la energía eléctrica por la mecánica y viceversa.

Un transductor es un cristal polarizado que aumenta sus dimensiones cuando se aplica el pulso eléctrico, y cuando se le deja aplicar, el cristal recupera sus dimensiones originales. Cuando el transductor es conectado a un generador de pulsos de alta frecuencia, las dimensiones de cristal aumentan y disminuyen simultáneamente con los pulsos eléctricos, esto es, el cristal vibra a alta frecuencia y genera ultrasonido. Esto se conoce como efecto piezoeléctrico inverso, pudiendo producirse del mismo modo en sentido opuesto (efecto piezoeléctrico directo).

Para propósitos de inspección, los transductores se alojan, junto con un material amortiguante, en una carcasa con una zapata y las conexiones necesarias. A este conjunto se les denomina palpador. [2].

#### **2.4.1.2. Equipo básico**

La mayoría de los sistemas de inspección ultrasónicos incluyen el siguiente equipamiento básico:

- Un generador de señal electrónica que produce estallidos de tensión alterna (una punta negativa o una onda cuadrada) cuando es activada electrónicamente.
- Un transductor (sonda o unidad de búsqueda) que emite un haz de ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alterno son aplicadas a él.

- Un acoplador para transferir energía del haz de ondas ultrasónicas para la pieza de prueba
- Un medio de acoplamiento para transferir la salida de ondas ultrasónicas (energía acústica) de la pieza de prueba para el transductor.
- Un transductor (puede ser el mismo que el transductor iniciando el sonido o puede ser uno separado) para aceptar y convertir la salida de las ondas de ultrasonidos de la pieza de prueba correspondientes a estallidos de voltaje alterno. En la mayoría de los sistemas, un único transductor alternativamente actúa como emisor y el receptor.
- Un dispositivo electrónico para amplificar y, si es necesario, o de otra manera modificar o extraer la información de las señales del transductor.
- Una pantalla o dispositivo indicador para caracterizar o grabar la salida de la pieza de prueba
- Un reloj electrónico, o temporizador, para controlar el funcionamiento de los diversos componentes del sistema, para servir como un punto de referencia primaria, y para proporcionar la coordinación para todo el sistema.

### **2.4.1.3. Características generales de ondas ultrasónicas**

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas que constan de oscilaciones o vibraciones de las partículas atómicas o moleculares de una sustancia sobre las posiciones de equilibrio de estas partículas. Pueden propagarse en un medio elástico, que puede ser sólido, líquido, o gaseoso, pero no en el vacío, habiendo 4 tipos de ondas de propagación del sonido (longitudinal, transversal, placa y superficiales).

La relación de la velocidad a la frecuencia y longitud de onda viene dada por:

$$V = f \lambda$$

**Dónde:**

V= Velocidad (en metros por segundo).

$F$ = Frecuencia (en hertzios).

$\Lambda$ = La longitud de onda (en metros por ciclo).

### **a) Ondas longitudinales, rectas o de compresión**

Estas ondas viajan a través de materiales como una serie de compresiones y rarefacciones (Hacer menos denso un cuerpo gaseoso) alternativas en el que las partículas de transmisión de la onda vibran adelante y atrás en la dirección de desplazamiento (modo paralelo) a la propagación del haz de sonoro. Su uso generalmente está limitado a la detección de inclusiones y discontinuidades de tipo laminar en metales base.

Las ondas ultrasónicas longitudinales se propagan fácilmente en líquidos y gases, así como en sólidos elásticos. La velocidad de las ondas ultrasónicas longitudinales es de aproximadamente 6,000 m/s (20.000 pies/s) en acero, 1,500 m/s (5000 pies/s) en agua, y 330 m/s (1080 pies / s) en el aire. Estas ondas son mostradas en la *Figura 2.15 (a)*. [21].

### **b) Ondas transversales o de corte**

Las ondas transversales se visualizan fácilmente en términos de vibraciones de una cuerda que se agita rítmicamente, en el que cada partícula, en lugar de vibración paralela a la dirección de movimiento de las ondas como en la onda longitudinal, vibra hacia arriba y hacia abajo en un plano perpendicular a la dirección de propagación.

Para la propagación de las ondas transversales, es necesario que cada partícula exhiben una fuerte fuerza de atracción a sus partículas vecinas para que cuando una partícula se mueve hacia adelante y hacia atrás se tira su partícula vecina con ella, haciendo así que el sonido pase a través del material con la velocidad asociada con las ondas transversales, que es aproximadamente el 50% de la velocidad de la onda longitudinal para el mismo material. [21].

Las ondas de corte son más útiles en la detección de discontinuidades de soldadura debido a que permiten fijar la localización, orientación y características de las discontinuidades en coordenadas de tres dimensiones. Estas ondas se muestran en la *Figura 2.15 (b)*. [2].

### **c) Ondas superficiales o de Raleigh**

Se propagan a lo largo de la superficie del metal de manera similar a las ondas sobre la superficie del agua, debido a que estas ondas tienen poco movimiento bajo la superficie del metal, no se emplean en el examen de juntas soldadas.

Tienen una velocidad de aproximadamente 90% de la velocidad de la onda transversal en el mismo material.

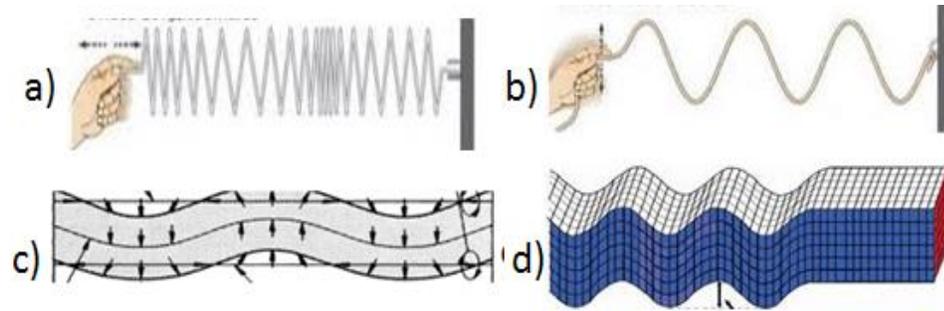
En las ondas de superficie, la oscilación de partículas generalmente sigue una órbita elíptica, como se muestra esquemáticamente en la *Figura. 2.15 (d)*. [2].

### **d) Ondas de Lamb, u ondas de placa**

Una onda Lamb consiste en una vibración compleja que se produce en todo el espesor del material. Las características de propagación de ondas de Lamb dependen de la densidad, propiedades elásticas, y la estructura del material, así como el espesor de la pieza de prueba y la frecuencia.

En ondas de Lamb simétricos (compresión), se produce un desplazamiento de compresión (longitudinal) de partículas a lo largo del eje neutro de la placa y un desplazamiento de partículas elíptica en cada superficie.

En ondas de Lamb asimétricas (corte), hay un desplazamiento de cizalladura (transversal) de partículas a lo largo del eje neutro de la placa y un desplazamiento de partículas elípticas en cada superficie, *Figura 2.15 (c)*. [21].



**Figura 2.15** Esquema de los tipos de ondas a) longitudinal, b) transversales, c) Lam (placa) y d) superficiales. La longitud de onda,  $\lambda$ , es la distancia correspondiente a un ciclo completo. [21].

Los ultrasonidos se obtienen por dos medios

- **Magneto-constricción:** es el cambio reversible de longitud que se produce en una varilla o tubo cuando se introduce en un campo magnético paralelo a su longitud, haciendo que la varilla vibre longitudinalmente. Las ondas se emiten por los extremos de las varillas. Este método no se utiliza en medicina actualmente debido a que las propiedades físicas de la varilla limitan la frecuencia. [2]
  
- **Efecto piezoeléctrico:** Consiste en la producción de potenciales eléctricos por parte de ciertos cristales cuando estos se comprimen. Si en lugar de comprimir al cristal se lo somete a la acción de corrientes eléctricas oscilantes dirigidas al eje eléctrico del cristal, este vibra generando un sonido cuya frecuencia es igual a la de la corriente eléctrica como consecuencia de las compresiones y dilataciones periódicas sufridas.
  
- El cristal emisor tiene otra característica que es el efecto de resonancia, es decir, que el cristal vibra con una frecuencia característica. [22].

#### 2.4.1.4. Principales variables de inspección ultrasónica

Las principales variables que deben tenerse en cuenta en la inspección ultrasónica incluyen tanto las características de las ondas ultrasónicas utilizadas y las características de las partes que se inspecciona.

Tipo de equipo y la capacidad de interactuar con estas variables. *Tabla 2.7* valores para una pieza de prueba dada las propiedades pueden diferir ligeramente de los valores.

**La frecuencia** de las ondas ultrasónicas utilizadas afecta a la capacidad de inspección de varias maneras. Generalmente, un compromiso se debe hacer entre los efectos favorables y adversos para lograr un equilibrio óptimo y para superar las limitaciones impuestas por el equipo y material de prueba.

**La sensibilidad**, o la capacidad de un sistema de inspección ultrasónica para detectar una discontinuidad muy pequeña, se incrementa generalmente mediante el uso de frecuencias relativamente altas (longitudes de onda cortas).

**Resolución**, o la capacidad del sistema para dar indicaciones simultáneas separadas de discontinuidades que están muy juntos tanto en profundidad por debajo de la superficie frontal de la pieza de prueba y en posición lateral, es directamente proporcional a la frecuencia de ancho de banda e inversamente relacionada con la duración del pulso.

**Penetración**, o la profundidad máxima (gama) en un material con el que se pueden detectar indicaciones útiles, este efecto es más pronunciado en la inspección de metal que tiene estructura de grano grueso o no hay homogeneidades.

**Apertura del haz**, o la divergencia de un haz de ultrasonidos desde el eje central del haz, también se ve afectada por la frecuencia. A medida que disminuye la frecuencia, la forma de un haz de ultrasonidos se aparta cada vez más de la ideal de dispersión del haz cero.

**Impedancia acústica.** Esta característica se utiliza en la inspección ultrasónica de metales para calcular las cantidades de energía reflejada y transmitida en las discontinuidades de impedancia y para ayudar en la selección de materiales adecuados para la transferencia eficaz de energía acústica entre los componentes en los sistemas de inspección ultrasónica.

**Ángulo de incidencia.** Sólo cuando una onda ultrasónica incide en ángulo recto sobre una interfaz entre dos materiales (incidencia normal, es decir, el ángulo de incidencia = 0 °) hace la transmisión y la reflexión se producen en la interfaz sin ningún cambio en la dirección del haz.

La ley general que describe el comportamiento de la onda en una interfaz que se conoce como la ley de Snell y puede ser expresado como

$$\sin \alpha / \sin \beta = V_1 / V_2$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de incidencia,  $\beta$  es el ángulo de reflexión o refracción, y  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades respectivas de incidencia y las ondas refractadas o reflejadas. Ambos  $\beta$  y  $\alpha$  son medidas a partir de una línea normal de la interface

**Ángulos críticos.** Si el ángulo de incidencia las ondas sonoras se propagan en un medio dado pueden someterse a modo de conversión en un límite, lo que resulta en la propagación simultánea de las ondas longitudinales y transversales (corte) en un segundo medio. Ángulos críticos son de especial importancia en la inspección ultrasónica.

**La intensidad del haz.** La intensidad de un haz ultrasónico está relacionada con la amplitud de las vibraciones de partículas. La presión acústica (presión sonora) es el término más utilizado para referirse a la amplitud de las tensiones ejercidas sobre un material por una onda ultrasónica de propagación alterna. La presión acústica es directamente proporcional al producto de la impedancia acústica y la amplitud de movimiento de las partículas. [21].

**Tabla 2.7** Parámetros para inspección ultrasónica.

Material	Densidad ( $\rho$ ) g/cm <sup>3</sup>	Velocidad de sonido, 10 <sup>5</sup> cm/s			Impedancia acústica ( $Z_1$ ) <sup>(d)</sup> , 10 <sup>6</sup> g/cm <sup>2</sup> *s
		$V_l$ <sup>(a)</sup>	$V_t$ <sup>(b)</sup>	$V_s$ <sup>(c)</sup>	
<b>Metales ferrosos</b>					
<b>Aceros al carbono, recocido</b>	7.85	5.94	3.24	3.0	4.66
<b>Aleaciones de acero</b>					
<b>Reconocido</b>	7.86	5.95	3.26	3.0	4.68
<b>Endurecidos</b>	7.8	5.90	3.23	...	4.6
<b>Hierro fundido</b>	6.95-7.35	3.5-5.6	2.2-3.2	...	2.5-4.0
<b>Metales no ferroso</b>					
<b>Aluminio 1100-o</b>	2.71	6.35	3.10	2.90	1.72
<b>Cobre 110</b>	8.9	4.70	2.26	1.93	4.18
<b>No metales</b>					
<b>Aire<sup>(e)</sup></b>	0.00129	0.331	...	...	0.00004
<b>Agua</b>					
<b>Líquido<sup>(f)</sup></b>	1.0	1.49	...	...	0.149
<b>Hielo<sup>(g)</sup></b>	0.9	3.98	1.99	...	0.36

(a) Ondas longitudinales.

(b) Ondas transversales.

(c) Ondas superficiales.

(d) Para ondas longitudinales  $Z_1 = V$ .

(e) En temperaturas y presiones estándares.

(f) En 4 °C.

(g) En 0 °C. [21].

### 2.4.1.5. Métodos empleados por ultrasonido

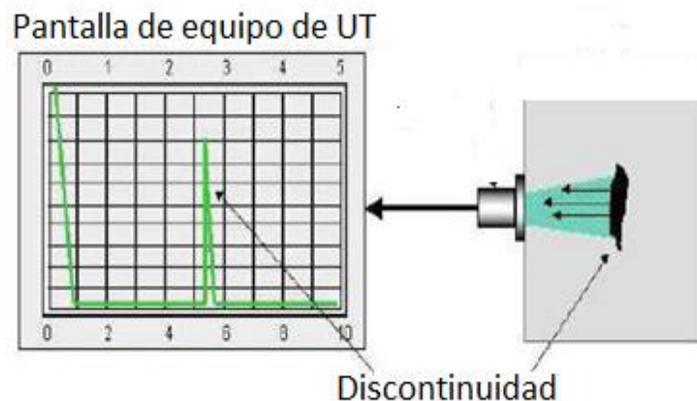
#### a) Método de pulso-eco

El método más comúnmente usado para la exploración manual de soldaduras es el de pulso-eco. Una vez que el transductor se acopla a la superficie del material a ensayar, el sonido viaja a través de este hasta que encuentre un obstáculo, que puede ser la superficie de la pared posterior de la

pieza de inspección. El sonido se refleja y regresa al transductor, mismo que produce pulsos de voltaje cuando recibe la energía del sonido. El impulso del voltaje es retro-alimentado al sistema del equipo y la señal correspondiente se muestra en un tubo de rayos catódicos.

En la pantalla del equipo de prueba (tubo de rayos catódicos) aparecen dos picos, uno a la izquierda que se conoce como eco principal y corresponde a la reflexión del ultrasonido al pasar del transductor a la pieza, y el pico de la derecha o eco de fondo corresponde a la superficie posterior de la pieza inspeccionada, misma que refleja el haz de ultrasonido incidente.

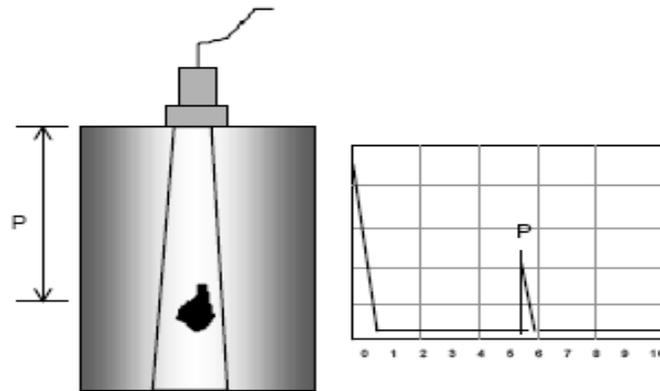
Este pico es menor a la atenuación. Si existe una discontinuidad en la pieza, abra una reflexión intermedia, misma que se detecta con otro pico entre los ecos principales y de fondo. La anchura y amplitud de este pico depende del tamaño y su orientación de discontinuidad (una superficie de reflexión) la *Figura 2.16*, ilustra de manera sencilla el metido anteriormente descrito. [21].



**Figura 2.16** Detección de una discontinuidad en el método pulso-eco. [2]

En el año de 2007 Jairo Rodríguez et al. Diseñaron un montaje de inspección ultrasónica mediante descargas rápidas de un alto voltaje almacenado en un condensador a través del transductor en el método pulso-eco implementando algoritmos (conjuntos ordenados y finos) que permitieron la formación de imágenes ultrasónicas, y el diagnóstico de fallas correctas.

La *Figura 2.17* ilustra en el palpador de haz recto.



**Figura 2.17** Inspección con palpador de haz recto. [2]

### **Ventajas:**

- Requiere acceso a una superficie únicamente
- Ubica la discontinuidad.

### **Desventaja:**

- No detecta discontinuidades muy cercanas a la superficie.

### **Aplicaciones**

- Medición de espesores.
- Detección de fallas:
  - examen de piezas fundidas.
  - examen de piezas forjadas.
  - examen de soldaduras.
- caracterización de materiales.

### **b) Método de transmisión-recepción**

En este tipo de método la transmisión de es realizada por haz directo o reflectivo, las fallas son detectadas comparando la intensidad del ultrasonido transmitido a través de la pieza contra la intensidad transmitida a través de una referencia estándar fabricada del mismo material.

Las pruebas de transmisión requieren de dos unidades de búsqueda, una para transmitir las ondas ultrasónicas y otra para recibirlas.

Un buen acoplamiento es crítico para los métodos de transmisión debido a las variaciones de sonido durante la transmisión.

**Ventaja:**

- Puede detectar discontinuidades muy cercanas a la superficie.

**Desventajas:**

- No ubica la discontinuidad.
- Requiere acceso a las dos superficies.

**c) Resonancia**

Se consigue que haya resonancia entre un material y el palpador. El palpador es de frecuencia variable, la cual se varía hasta hallar la de resonancia. Es utilizado para la detección de discontinuidades externas del material, también para la medición de espesores.

**d) Inmersión**

Las ventajas de la inspección de inmersión incluyen la velocidad de inspección, la capacidad de controlar y haces de sonido directo, y la capacidad de adaptación para la exploración automatizada. La angulación se utiliza en la inspección de inmersión para identificar con más precisión la orientación de defectos por debajo de la superficie de la pieza de prueba.

En la inspección de inmersión convencional, tanto la unidad de búsqueda y la pieza de prueba se sumergen en agua. El haz de sonido es dirigido hacia la pieza de prueba utilizando una técnica de recta de haz (onda longitudinal) o una de las diversas técnicas de ángulo de haz, tales como cizalladura, combinado longitudinal y de corte, o una onda Lamb. [21].

**2.4.1.6. Ventajas y desventajas del ultrasonido**

Las principales ventajas de la inspección por ultrasonidos, en comparación con otros métodos para la inspección no destructiva de las piezas de metal son:

- Poder de penetración superior, que permite la detección de defectos profundos en la zona. Alta sensibilidad, que permite la detección de defectos extremadamente pequeños.
- Mayor precisión que otros métodos no destructivos en la determinación de la posición de defectos internos, la estimación de su tamaño, y la caracterización de su orientación, la forma y la naturaleza.
- La operación es electrónica, que proporciona indicaciones casi instantáneas de los defectos.
- Capacidad volumétrica de exploración, lo que permite la inspección de un volumen de metal que se extiende desde la superficie frontal a la superficie posterior de una pieza.
- No peligroso para las operaciones o personal cercano y no tiene ningún efecto sobre el equipo y los materiales en las proximidades.
- Portabilidad
- Proporciona una salida que puede ser procesada digitalmente por un ordenador para caracterizar defectos y para determinar las propiedades del material.

Las desventajas de inspección por ultrasonidos incluyen lo siguiente:

- Funcionamiento manual requiere una cuidadosa atención por técnicos experimentados.
- Se requiere conocimiento técnico extenso para el desarrollo de los procedimientos de inspección.
- Las piezas que son ásperas, de forma irregular, muy pequeño o delgado, o no homogéneo son difíciles de inspeccionar.
- Discontinuidades que están presentes en una capa poco profunda inmediatamente por debajo de la superficie pueden no ser detectables.
- Se necesitan acopladores para proporcionar la transferencia efectiva de la energía de las ondas ultrasónicas entre los transductores y la parte de la pieza que está siendo inspeccionada.

- Se necesitan patrones de referencia, tanto para la calibración de los equipos y para la caracterización de los defectos.
- Dispersión por superficies rugosas o partículas reduce la energía de un haz ultrasónico, comparables a la forma en que la dispersión se reduce la intensidad de un haz de luz. [21].

**Tabla 2.8** Requerimientos de la norma ASME y API para inspección con UT.

<b>Ultrasonido</b>	
<b>ASME</b>	<b>API</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se debe emplear una técnica de eco-pulsado.</li> <li>➤ La frecuencia a emplear puede variar de 1 a 5 MHz.</li> <li>➤ El acoplante usado dependerá del tipo de material, y éste no deberá ser perjudicial al material.</li> <li>➤ Tres rayos (haz) angulares, que tienen ángulos nominales de 45, 60 y 70 grados con respecto a una perpendicular a la examinación de la superficie, deben ser empleados.</li> <li>➤ Las variables esenciales a considerar son:               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Geometría de la pieza, la superficie, tipo de técnica ultrasónica a emplear</li> <li>b) Calibración del equipo</li> <li>c) Dirección de escaneo, personal empleado</li> <li>d) Ángulos y tipo de ondas.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La inspección por ultrasonido en tubería debe ser capaz de:               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Inspeccionar a través de todo el espesor del cordón de soldadura y de las paredes de la tubería.</li> </ul> </li> <li>➤ Tubos soldados con metal de aporte, el metal de soldadura más 1/16 de pulgada (1,6 mm) de metal base adyacente a cada lado del metal de soldadura.</li> <li>➤ El equipo deberá ser normalizado con un estándar de referencia aplicable al menos una vez por cada 8 horas por turno de operación para demostrar su eficacia los procedimientos de inspección.</li> </ul>

A través de los años las innovaciones de las técnicas no se han hecho esperar, el ultrasonido convencional es una de las técnicas de inspección que en la actualidad cuenta con diversas variaciones, cumpliendo con el mismo principio de operación pero ofreciendo resultados diversos.

#### **2.4.1.7. Innovaciones de la técnica de ultrasonido convencional**

La calidad de los componentes soldados para un servicio establecido es de vital importancia, por lo que cada vez más se requieren de ensayos que permitan una inspección y evaluación con mejores resultados, por lo que en los últimos se han desarrollado o innovado END que permiten lograr dichos objetivos, un mismo ultrasonido de haz recto (convencional) ha sido modificado de diversas maneras, como ha sido el actual ultrasonido por arreglo de fases o

un ultrasonido por láser pulsado, ambos mismo principios diferentes aplicaciones y resultados.

### Ultrasonido por arreglo de fases

En todas estas áreas, los arreglos de fases ofrecen un cambio importante sobre los transductores tradicionales de un elemento. Esto se debe al uso de más elementos en los transductores, permitiendo la inspección a detalle y obtener una proyección tridimensional completa. [23].

Básicamente el arreglo de fase por ultrasonido incorpora probadores con elementos múltiples (cristales) con un control por computadora de cada elemento en tiempo para obtener imágenes de tiempo real y simplificar el método de prueba no destructiva a diferencia del ultrasonido convencional que es de un solo elemento, como se muestra en la Figura 2.18.



**Figura 2.18** Comparación ultrasonido b) arreglo de fases con a) ultrasonido convencional. [13].

En el año del 2006 Drinkwater en compañía de Wilcox, desarrollaron un análisis para la detección de defectos empleando diferentes transductores para la inspección con ultrasonido por arreglo de fases, en donde observaron a detalle mejores proyecciones tridimensionales de los defectos. Llegaron a mostrar resultados en donde el arreglo de fases concluyó con ventajas como:

- Resultados en tiempo muy rápidos.
- Una precisión en la determinación de la posición de la discontinuidad.

- Elevada sensibilidad para detección de discontinuidades internas y pequeñas, por lo que hubo mayor penetración del haz. [24].

Anandamurugan en el año 2009 experimentó con la inspección de soldadura por medio de un manual sobre la técnica de ultrasonido con arreglo de fases, en donde trabajó con probetas a las que se le realizaron discontinuidades intencionales como punto de comparación, las cuales arrojaron imágenes correspondientes a la discontinuidad detectada, de acuerdo a sus resultados llegaron a las siguientes conclusiones:

- Con el manual de inspección con arreglo de fases se pueden obtener resultados en tiempos cortos, obteniendo mayor productividad.
- Se pueden detectar fácilmente discontinuidades orientados en cualquier ángulo por lo que se pueden representar en imágenes con la capacidad de dirección electrónica.
- El inspector podrá identificar fácil y rápidamente la ubicación de la discontinuidad y evaluarla para determinar si es un defecto, esto gracias al avance del software para dibujar las imágenes de superposición de la soldadura, mediante la identificación y medición de la profundidad respecto a la superficie de exploración. [25].

### **Ultrasonido por láser pulsado**

Una de las innovaciones que se ha logrado en los END para la inspección de discontinuidades ha sido el poder llevarse a cabo sin la necesidad de que el equipo haga contacto directo con la pieza de trabajo. Han sido de gran aplicación ya que los resultados que éstos han arrojado han sido aceptados por la industria ya que una de las principales ventajas que se obtuvieron fue la reducción de tiempo para la inspección de diversos componentes.

En el 2004 Robert Green hizo hincapié en la importancia de emplear técnicas de inspección sin contacto ya que éstas permiten realizar mediciones a

temperaturas elevadas, en entornos corrosivos, y que logran inspeccionar en lugares de difícil acceso.

Una de las técnicas que describió fue el ultrasonido por láser pulsado (LUS por sus siglas en inglés), haciendo un comparativo entre éste y el ultrasonido convencional, concluyendo que el LUS al no requerir acoplante, la resolución de imágenes suele ser más limpias y que los resultados son muy precisos, además que permiten la generación y detección de ondas acústicas con menos modificación en las formas de ondas y la gama de frecuencia. [26].

Siguiendo dicha investigación en el año 2011 el investigador Schneider et al. desarrollaron un estudio sobre la importancia del módulo de Young durante la inspección ultrasónica por láser, mostrando que de acuerdo a las características y espesores del material su módulo de elasticidad será variado y éste opondrá resistencia a la propagación de las ondas provocadas por el mismo material..

Emplearon ondas superficiales que tuvieron la propiedad única en que su profundidad de penetración en el material disminuye con un incremento en su frecuencia. El módulo de Young lo determinaron por la velocidad del volumen de ondas acústicas, demostrando que a mayor profundidad menor frecuencia de las ondas superficiales, obtuvieron calcularon la densidad y espesor del material, demostrando que el material a ciertas temperaturas tiene mayor módulo de Young. [27].

En 2010 Lee et. al. desarrollaron un método para la formación de imágenes por propagación ultrasónica de ondas transformadas para la visualización de defectos o daño estructural.

Lograron el escaneo estable a alta velocidad rápida de una estructura sándwich hecho de capas de aleación de aluminio y un núcleo de espuma con un espesor de 5mm, emplearon una frecuencia de repetición de impulsos superior a base de las ondas residuales causada por el láser incidente anterior a 1.5 KHz mediante la adopción de un láser con espejo galvano-motorizado, y

con un generador de ultrasonidos con láser mejorado con un Q-Switched Nd: YAG bombeado con diodo láser de estado sólido con una longitud de onda de 1064nm y un diámetro del cabezal del láser de 0.7mm en un tiempo de 270 segundos

La principal contribución del método de imagen de propagación ultrasónica de ondas transformadas propuesta es su excelente selectividad de frecuencias de acuerdo al material y espesor del mismo. [31].

## **2.4.2. Ensayo no destructivo por radiografía**

Este método se emplea para detectar discontinuidades internas y superficiales en juntas soldadas y piezas forjadas o fundidas, además de usarse en otro tipo de industrias y aplicaciones, tales como las médicas y de investigación.

### **2.4.2.1. Principios y descripción de la técnica**

En radiografía se emplea radiación para penetrar los objetos a examinar y producir una imagen de su interior, misma que se fija en algún medio de registro (película fotográfica y papel sensitivo) o puede ser desplegada en una pantalla fluorescente o en detectores electrónicos de radiación.

Los rayos x se generan por medio de dispositivos electrónicos de alto voltaje y los rayos gamma por fuente radioactivas naturales o por isotopos radioactivos artificiales productos para fines específicos de radiografía industrial, tales como iridio 192, cobalto 60, cesio 137 y tulio 170.

La mayoría de los procesos radiográficos convencionales que se usan en la actualidad involucran el empleo de radiación electromagnética y el registro de la imagen en película radiográfica.

La cantidad de radiación absorbida y transmitida dependen del espesor del material y de su densidad, así como las características de la radiación misma, por lo que existen discontinuidades en las partes radiografiadas, al ser de diferente densidad que la del material, las zonas discontinuidades absorben y

transmiten mayor o menor cantidad de radiación, y las variaciones en la radiación transmitida producen áreas de contraste óptico sobre los medio de registro. [21].

#### 2.4.2.2. Equipo de radiografía

Dependiendo de las necesidades particulares de cada aplicación, son necesarias fuentes de rayos x o rayos gamma, accesorios para la toma y manejo de las películas e instalaciones para el procesamiento de las películas y para su Interpretación; o bien, el equipo de examen radioscópico en tiempo real. El equipo de detección de radiación y el de seguridad y dosimetría del personal también debe ser considerado. En la *Figura 2.19* se muestra el equipo de radiografía así como una imagen radiográfica sobre una grieta transversal.

La inspección básica por medio de radiografía requiere de los siguientes elementos esenciales:

- Una fuente de radiación (la mayoría de las veces de rayos x o gamma).
- El objeto a ser radiografiado.
- El medio de registro o dispositivo para desplegar las imágenes. La mayor parte de las veces se usa película radiográfica empaquetada en un soporte a prueba de luz.
- El personal calificado capaz de hacer la toma radiográfica (explosión) de manera satisfactoria y segura
- Los recursos para procesar la película expuesta o de operar otros medios de registro.
- El personal capacitado para realizar de manera adecuada la interpretación de las imágenes radiográficas. [2].



**Figura 2.19** Equipo de Rayos X a) y b) Radiografía de una grieta transversal. [11].

### 2.4.2.3. Calidad de una imagen radiográfica

Las imágenes radiográficas deben proveer información útil del interior de las partes examinadas a fin de determinar si estas contienen defectos, y la utilidad de información está determinada por el contraste y definición radiográficos, los cuales son afectados, respectivamente, por dos categorías de variables, las de exposición y las geométricas, mismas que deben ser controladas rigurosamente, ya que si no son, los resultados de la inspección no son confiables, por lo que antes de poder evaluar de manera efectiva las discontinuidades reveladas en las imágenes, primero debe determinarse que la calidad de estas últimas es satisfactoria.

Algunos aspectos clave y requisitos básicos útiles para estimar la calidad de las imágenes radiográficas son:

**a) Indicadores de calidad de imagen:** La herramienta empleada para asegurar si se empleó la técnica adecuada para controlar la variable que afectan la calidad de las radiografías es el indicador de calidad de imagen (IQI) o penetración.

Edson Vásquez Moreir et al. En el año del 2010, realizó trabajos de inspección de uniones soldadas con SAW en metales API X70, mediante una comparación de rayos “X” convencionales y radiografía digital, después de llevar a cabo diversos experimentos, el método digital mostró la mayor sensibilidad para el indicador de calidad de imagen (IQI) del alambre y también en términos de la detección de pequeñas discontinuidades, concluyendo que el uso de la radiografía digital utilizando el detector en plano puede utilizarse directamente en las líneas de producción de tubos en el sector de petróleo y gas, con ventajas sobre el técnica convencional. [29].

**b) Densidad radiográfica:** La densidad radiográfica de una película en su grado de “ennegrecimiento”, es decir, la cantidad de luz que permite pasar a través de ella. [30].

Dong Du y colaboradores, en el año del 2008 por medio de la separación de la transformación de las imágenes de radiografía en dos etapas, primero el registro de la rotación y segundo el registro de la traslación, determinaron los ángulos de pendientes para la proyección de las imágenes como para la recepción de las mismas, obteniendo la calidad de las imágenes en tiempo real por medio de los rayos “X” para la detección de las discontinuidades. [31].

#### **2.4.2.5. Ventajas y desventajas de los rayos “X”**

##### **Ventajas:**

- Proporciona un registro permanente de los resultados.
- Las imágenes radiográficas ayudan a caracterizar las discontinuidades.
- Puede aplicarse a diversos materiales.
- Puede detectar discontinuidades internas y superficiales.
- No está restringido por la estructura de grano de los metales.
- Equipo para radiografía con rayos x puede ajustarse a diferentes niveles de energía, y las imágenes radiográficas son de calidad superior a las obtenidas con rayos gama.

##### **Desventajas:**

- Una limitante de consideración es que las discontinuidades aplanadas (desgarre laminar, con cierta medida grietas y fusión incompleta) puede no ser detectadas, o detectadas con confiabilidad marginal si estas no están alineadas con el haz de radiación.
- No es un método que debe aplicarse para detectar laminaciones o traslapes.
- Se requiere tener acceso por dos lados opuestos del objeto a inspeccionar.
- El equipo es costoso.
- El equipo de rayos x generalmente no es portátil.
- La actividad de las fuentes de rayos gamma decae y su nivel de energía constante (longitud de onda) no puede ser ajustado.

- La radiación representa un alto riesgo para la seguridad del personal, por lo que el almacenamiento y el manejo de las fuentes requiere de las instalaciones, cuidados y entrenamiento riguroso.
- Requiere del personal altamente entrenado, capacitado y con experiencia.
- No indican la profundidad en la que se encuentran las discontinuidades, a menos de que se empleen técnicas especiales.
- No se recomienda su uso para la inspección de partes de geometría complicada, ya que los resultados podrían ser pocos confiables
- La operación del equipo representa riesgos de salud si no se observan las normas de seguridad pertinentes. [2].

**Tabla 2.9** Requerimientos de ASME y API para inspección radiográfica.

<b>Radiografía</b>	
<b>ASME</b>	<b>API</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ El área a ser radiografiada debe de estar libre de químicos, manchas o demás imperfecciones que puedan provocar indicaciones falsas.</li> <li>➤ La energía de la radiación empleada para cualquier técnica radiográfica deberá lograr la densidad y requisitos de imagen (IQI) del código.</li> <li>➤ La dirección de la radiación debe estar centrada sobre el área de interés, siempre que sea práctico.</li> <li>➤ Los IQI se tomarán, ya sea del mismo material de la aleación de grupo o grado como es identificado en SE-1025 o SE-747 como aplique, o de un grupo de materiales de aleación o grado con menos absorción de la radiación que el material que está siendo radiografiado.</li> <li>➤ La densidad de radiografía con una fuente de rayos X será mínimo de 20g/m<sup>3</sup>.</li> <li>➤ Para tuberías se debe de realizar la radiografía en una pared simple permitiendo la inspección en todo el componente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Los IQI deben ser colocados de manera adyacente y paralela a la soldadura.</li> <li>➤ La sensibilidad de los IQI ya sea de agujeros o de alambre, será máxima cuando éstos sean observados fácilmente por el operador.</li> <li>➤ Las indicaciones son consideradas defectos a base de su tamaño o sumatoria de diámetros en una distancia establecida.</li> <li>➤ Las grietas, la falta de penetración, falta de fusión, y las imperfecciones mayores en tamaño y / o distribución que se muestra en las Tablas 21 y 22 y las Figuras 7 y 8, como se indica por inspección radiológica, se considerarán defectos.</li> </ul>

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

La fabricación de tuberías para la transportación de hidrocarburos, debe de ser de la manera más óptima posible, para ello se requieren de procesos de soldadura que brinde propiedades mecánicas así como lograr fabricación en serie para la alza en los beneficios de los fabricantes.

Estableciéndose por oliva en el 2007 [2] que el proceso de soldadura que logra ambas cualidades es el proceso SAW, ya que al ser un proceso automatizado puede lograr cordones de soldadura continuas de hasta más de 20m, además de lograr penetraciones profundas por lo que los espesores a soldar no es una limitante de importancia y brindar propiedades altas ya sean químicas o mecánicas.

J. G. Young *et al.* 2013 [17] argumenta que los procesos de arco incluyendo el proceso SAW, están expuesto a la formación de diversas discontinuidades entre las que se encuentran porosidades, falta de fusión y de penetración, socavados, traslapes y siendo la más importante a cuidar, las grietas, ellos determinaron que en un defecto subsuperficial lo más importante es su profundidad y no de su longitud.

Por lo que el G. Young [17] en sus publicaciones explica la importancia de la inspección de la soldadura en 3 etapas (antes durante y después de la realización de la soldadura), esto con el fin de lograr el control de calidad y

asegurarse que la aptitud del componente será la óptima a la hora de brindar su servicio.

En el año 2010 Mendoza [20] con sus colaboradores exponen la importancia y ventajas que trae consigo utilizar ensayos no destructivos (END) durante la inspección de tuberías y que para garantizar la calidad del componente es conveniente utilizar diferentes métodos de pruebas para una sola inspección ya que cada prueba presenta un propósito y un alcance definido.

Wilcox y Drinkwater en el 2006 [24], y Anandamurugan en 2009 [25] durante su experimentación utilizaron el método de ultrasonido por arreglo de fases concluyendo que se requiere un tiempo de inspección menor, una mayor sensibilidad y precisión en la detección de discontinuidades en comparación con un ultrasonido convencional; además de permitir una visualización más amplia de las discontinuidades detectadas para un análisis más completo y fácil de realizar.

En la actualidad existen innovaciones de los END que logran obtener mejores resultados, en 2004 [26] Green describió técnicas de inspección que no requieren contacto con la pieza, uno de ellos es el ultrasonido por láser pulsado en el que explica que éste logra la formación de las ondas por medio de un calentamiento de la superficie por un bombardeo con un haz de laser logrando la formación de las ondas ultrasónicas, por lo que la inspección se puede hacer en materiales en caliente y frío, o ambientes hostiles sin la mayor complicación.

El investigador Schneider en 2011 [27] recalca que el funcionamiento del ultrasonido por láser pulsado, se debe o está en función del material ya que para su mejor inspección la principal característica que debe de tener es el de ser elástico, ya que el material al ser calentado éste se contrae y expande logrando la formación de las ondas ultrasónicas por lo que la aplicación del método es a base del módulo de Young.

## CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO

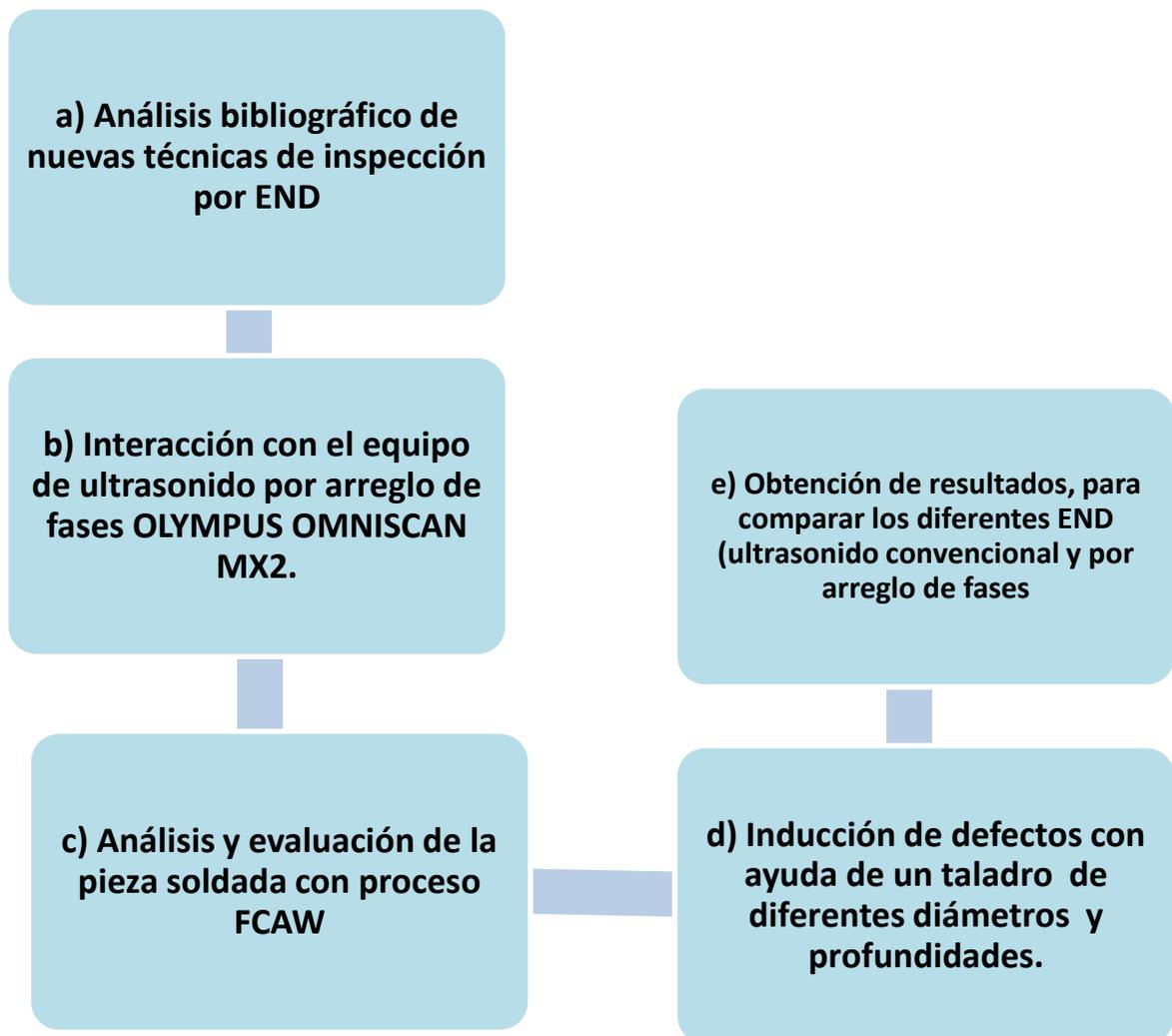
El estudio del arte en relación a un caso de estudio realizado en la CTM gracias al apoyo de la Universidad Politécnica de Cataluña, en él, se realizó la inspección de piezas soldadas y metal base para la detección de discontinuidades, para así realizar la comparación de END que emplea la empresa Tubacero con herramientas de innovación.

La inspección aplicada fue por medio de un ultrasonido por arreglo de fases OLYMPUS A SCAN con un transductor de 64 cristales piezoeléctrico, sobre una pieza soldada con proceso de arco de núcleo fundente FCAW (por sus siglas en inglés) la misma pieza fue sometida a la inducción de defectos para determinar la capacidad de un ultrasonido de arreglo de fases a comparación de un ultrasonido convencional (haz recto). Se empleó el proceso FCAW por la razón que el UT por arreglo de fases no tiene limitantes de inspección en los procesos de soldadura por arco, además como se muestra en la *Tabla 2.5* las discontinuidades como escoria atrapada, poros, falta de penetración, falta de fusión, traslapes son comunes en ambos procesos, y que éstos mismos tiene un principio de operación en cuanto entrada de calor, tasas de deposición similares. Y que el ultrasonido no tiene limitantes en procesos de soldadura.

Los datos obtenidos se presentan en la sección 4.4 Resultados, explicando imágenes proyectadas por el UT de arreglo de fases. Además de presentarse una tabla comparativa sobre los beneficios que pueden brindar los END descritos en el presente trabajo.

## 4.1. Metodología

Para llevar a cabo el caso de estudio se desarrolló un diagrama donde se representa los pasos empleados para la realización del mismo, en cual se consideraron desde un estudio bibliográfico así como realización de inspección de soldadura a basa de un ultrasonido por arreglo de fases. En la *Figura 4.1* se muestra el diagrama de la metodología empleada para la realización del caso de estudio. Con el fin de obtener aprendizaje sobre los beneficios que brinda un ultrasonido por arreglo de fases



**Figura 4.1** Metodología aplicada en el caso de estudio.

## 4.2. Materiales

a) Placa de acero API 5L X70, soldada con el proceso FCAW con los siguientes parámetros:

- Velocidad de avance: 6.3 m/min.
- Amperaje: 470-520 A°.
- Voltaje: 35 V.
- Gas: CO<sub>2</sub>.
- Temperatura entre pasadas: 65 °C.
- CDEP.
- Dimensiones de la pieza inspeccionada: 15cm X 5cm X 2 cm.

b) Ultrasonido de arreglo de fases OLYMPUS OMNISCAN MX2. Modo A SCAN

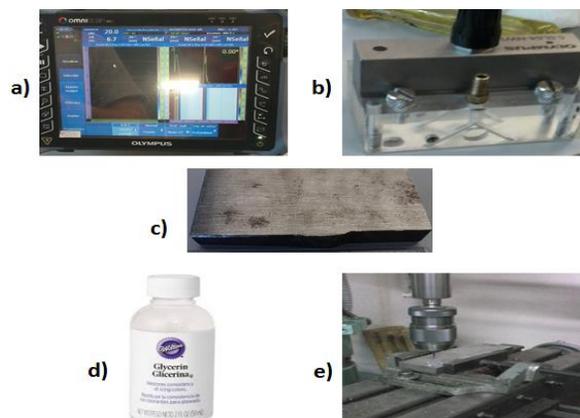
c) Transductor de 64 cristales piezoeléctrico NW. OLYMPUS de 5 MHz

Taladro semiautomático con brocas de diámetros de:

- 2.59cm
- 3.05cm
- 3.14cm

d) Zapata de 20mm de espesor SNW1-OL-IHC.

e) Glicerina como medio acoplante.



**Figura 4.2** Materiales empleados en el caso de estudio, a) Equipo UT, b) transductor y zapata, c) pieza de inspección, d) glicerina, e) taladro mecánico.

### 4.3. Experimentos realizados

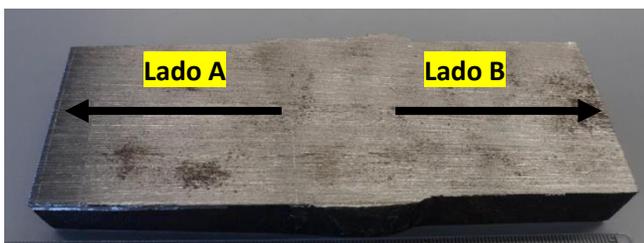
Inspección y evaluación de piezas por medio de un ultrasonido por arreglo de fases para realizar la comparación sobre la sensibilidad, capacidad profundidad y tiempos de inspección a comparación con un ultrasonido convencional. Empleando un barrido en una pieza soldada con FCAW además de la inducción de discontinuidades sobre la misma pieza.

Además de llegar a proponer por medio del estudio del arte una técnica que brinde mejores resultados, diferentes a las técnicas manejadas en éste documento.

### 4.4. Resultados

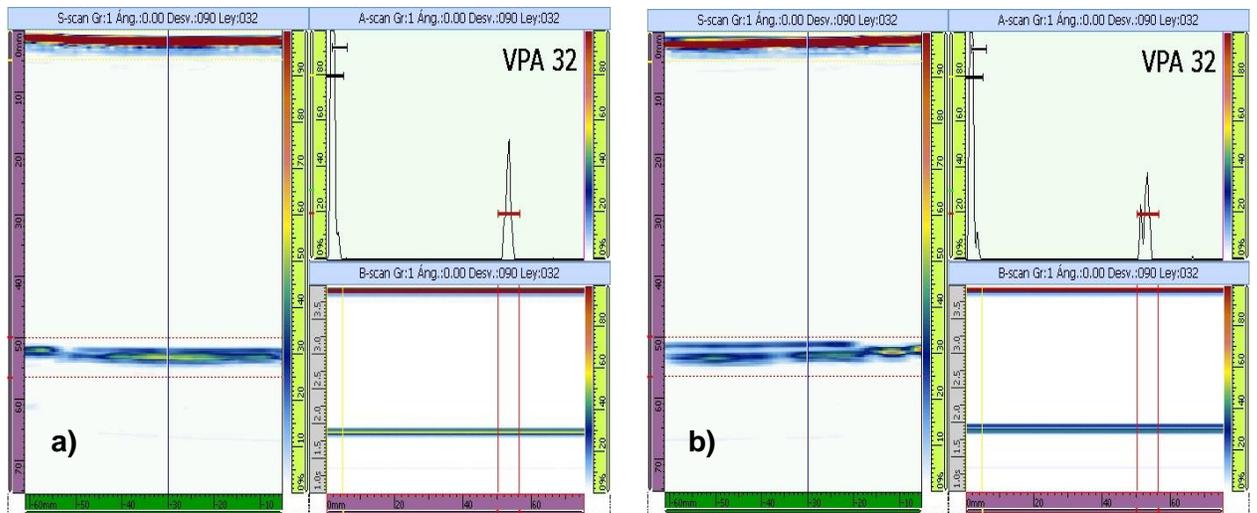
**a) Inspección de una pieza soldada por el proceso de soldadura FCAW semiautomático, con los siguientes parámetros.**

a) Seccionado e inspección de la pieza por medio del ultrasonido arreglo de fase, ver Figura 4.3.



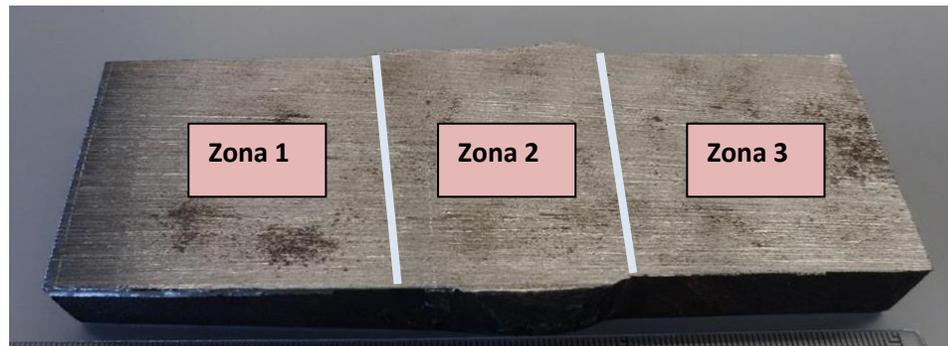
**Figura 4.3** Identificación de las zonas para inspeccionar en la pieza.

La Figura 4.4 muestra los resultados obtenidos durante la inspección soldada por FCAW. Dicha inspección se le realizó a la pieza sin alteración alguna (inducción de discontinuidades).



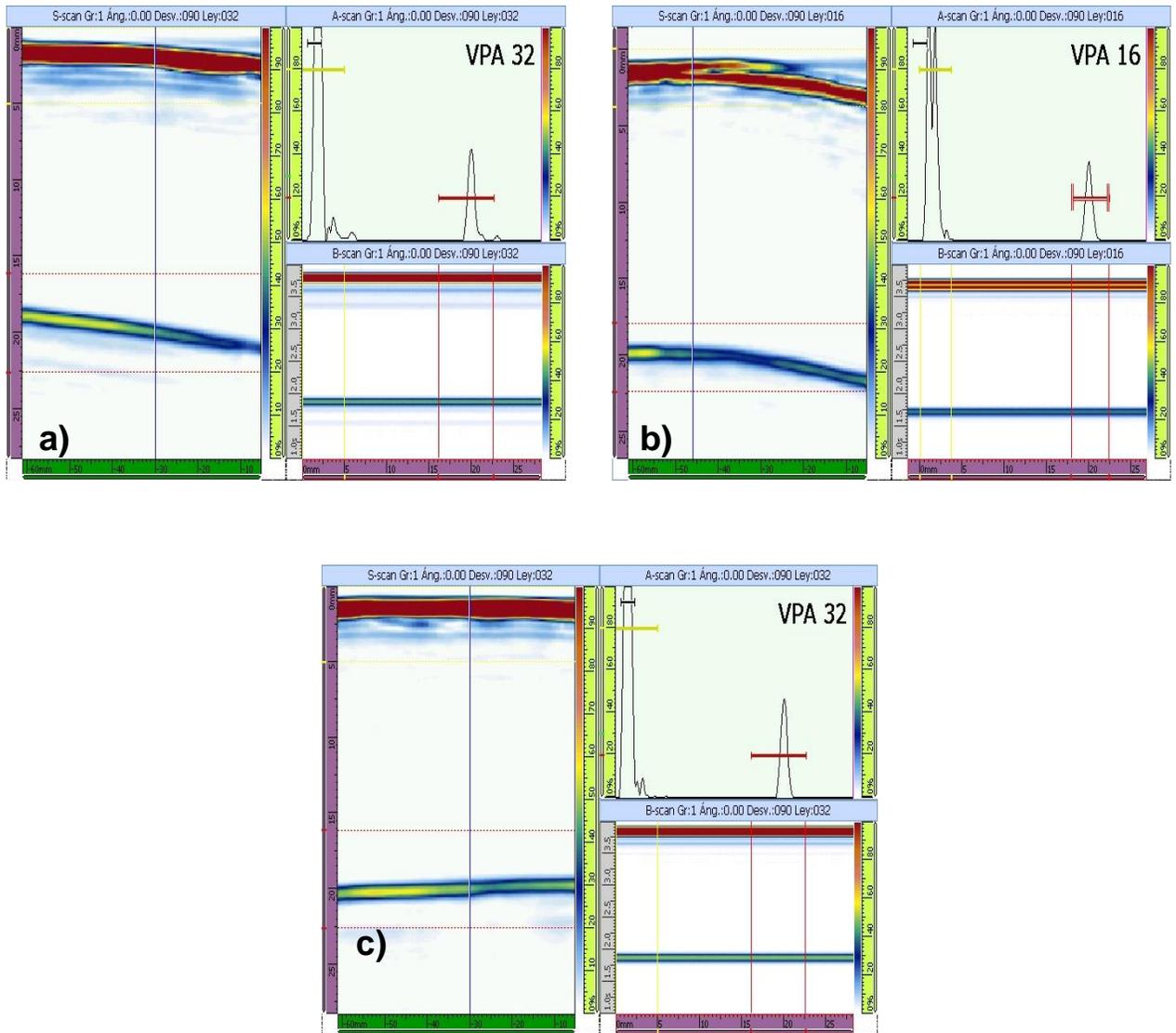
**Figura 4.4** Inspección por medio de ultrasonido con arreglo de fases a) en lado A y b) en lado B, observando que en ambos lados de la pieza está libre de cualquier indicación de importancia.

**b) Inspección de las 3 zonas en la que se dividió la pieza en su largo total.**



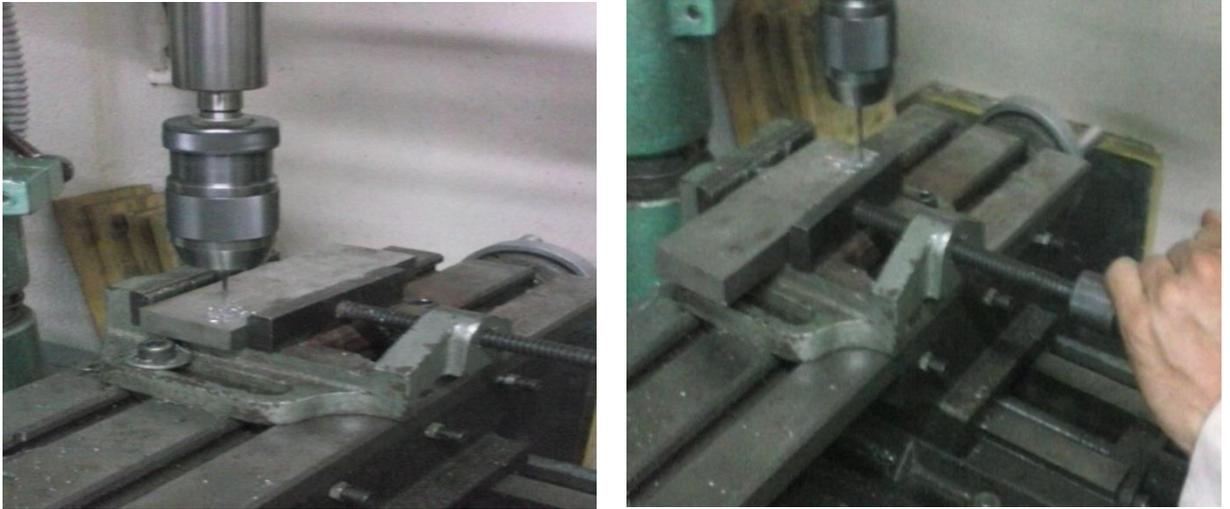
**Figura 4.5** Zona 1 corresponde al metal base, zona 2 correspondiente a la soldadura y, zona 3 es metal base.

Los resultados mostrados en la figura 4.6 b), son de la aplicación y servicio de un mal acoplante provocando la formación de burbujas en la interfase de la zapata y la superficie de la pieza, lo que ocasiona una mala distribución de las ondas ultrasónicas.



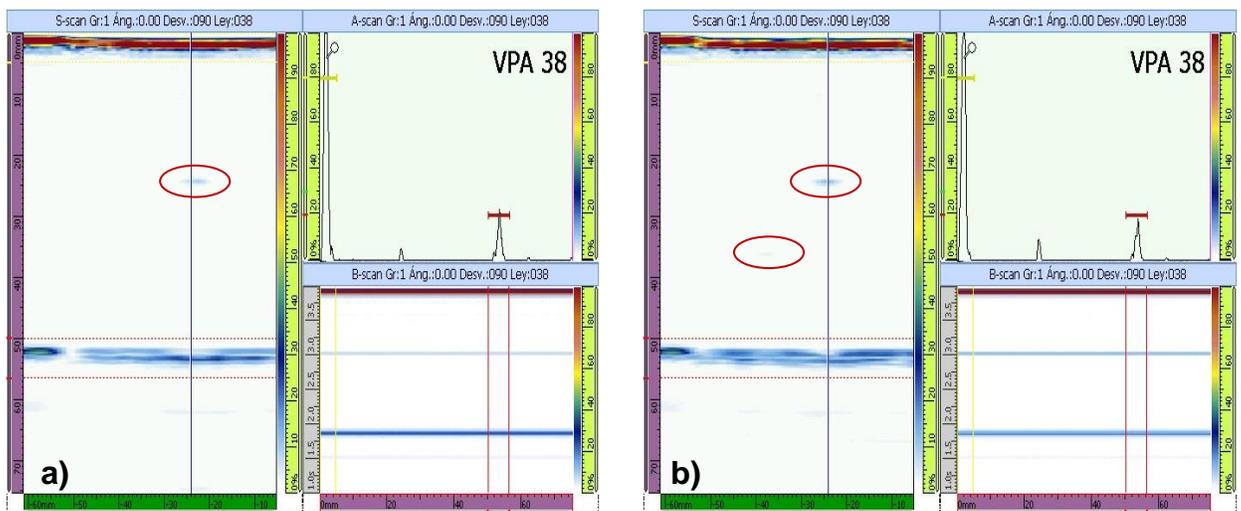
**Figura 4.6** Mediante la inspección de las piezas en a) zona 1, b) zona 2 (se nota distorsión en la interfase debido al mal acoplante), c) zona 3, se determinó que la pieza se encuentra libre de discontinuidades y/o defectos.

**c) Inducción de discontinuidades en diferentes zonas en la pieza para la detección de las mismas por medio de ultrasonido arreglo de fase.**



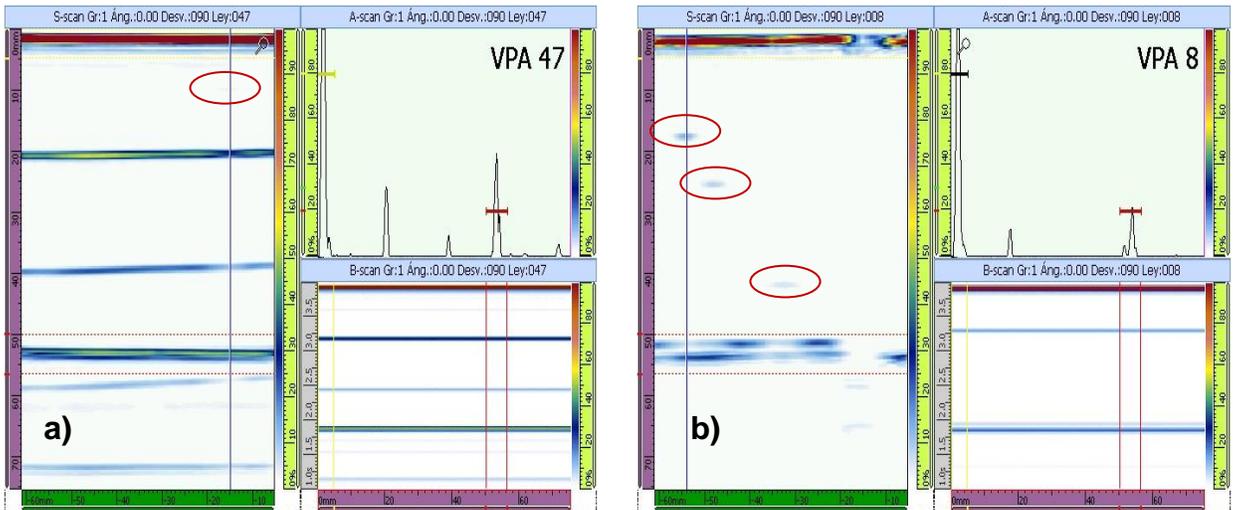
**Figura 4.7** Con brocas de diámetros de a) 2.59mm, b) con 3.06mm y 3.14mm. Se realizaron perforaciones para inducir discontinuidades en diferentes zonas de la pieza, para ser inspeccionadas con ultrasonido con arreglo de fases.

La Figura 4.8 muestra indicaciones encontradas con el UT arreglo de fases, así como en la figura 4.8 b) se observa que con la inspección en un área se pueden detectar diversas discontinuidades en un solo tiempo, por lo que se determina que la sensibilidad de detección es mayor.



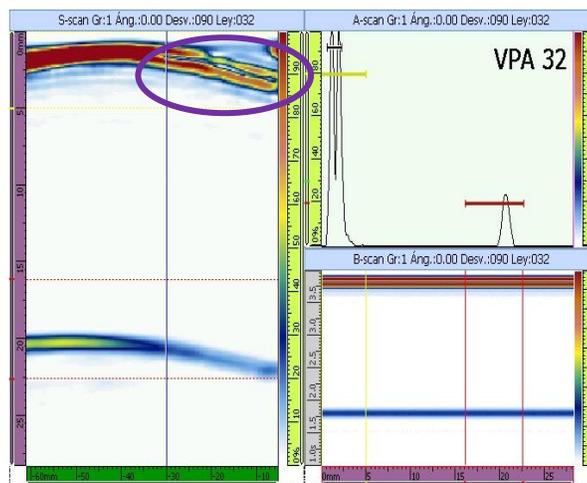
**Figura 4.8** Inspección del lado A correspondiente a la zona 1, se observa en a) una discontinuidad detectada con el piezoelectrico número 38, en b) se detectaron dos discontinuidades al mismo tiempo, uno con piezoelectrico 38 y otro con el número 16.

Los resultados mostrados en la Figura 4.9 son los obtenidos durante la inspección del lado B, en donde la figura 4.9 b), indica la detección de 3 discontinuidades con diversos cristales piezoeléctricos, recalcando la alta sensibilidad de detección del UT por arreglo fases.



**Figura 4.9** Inspección del lado B correspondiente a la zona 2 a) se detectó una discontinuidad con el piezoeléctrico número 47 en la zona de la ley focal, b) detección de 3 discontinuidades con los piezoeléctricos 8, 32, 47. Observando la alta sensibilidad para la detección de diversas discontinuidades en una sola pasada.

**d) Demostración del acoplante, parte esencial durante la realización de la inspección por medio de ultrasonido de arreglo de fase.**



**Figura 4.10** Se muestra la zona en la interfase de la pieza y el transductor la cual esta distorsionada debido a la formación de burbujas, el acoplante empleado fue glicerina.

**e) Datos de las discontinuidades inducidas en la pieza a inspeccionar.**



**Figura 4.11** Pieza con defectos inducidos y detectados.

**Tabla 4.1** Defectos detectados a diversas profundidades.

<b>Agujero</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Diámetro (cm)</b>
<b>a)</b>	34.12	2.59
<b>b)</b>	22.34	2.59
<b>c)</b>	15.48	3.05
<b>d)</b>	23.22	3.07
<b>e)</b>	40.07	3.14

**Tabla 4.2** Muestra un comparativo entre los END actuales y los propuestos durante la realización de éste proyecto.

<b>Radiografía industrial</b>	<b>Ultrasonido convencional</b>	<b>Ultrasonido arreglo de fases</b>	<b>Ultrasonido por láser pulsado</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Resultados permanentes</li> <li>➤ Discontinuidades subsuperficiales y superficiales</li> <li>➤ Evaluación de todos los procesos de soldadura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Inspección volumétrica</li> <li>➤ Discontinuidades subsuperficiales y superficiales</li> <li>➤ Alta profundidad de inspección</li> <li>➤ Resultados en tiempo real</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Inspección volumétrica</li> <li>➤ Discontinuidades subsuperficiales y superficiales</li> <li>➤ Mayor sensibilidad y resolución en la inspección</li> <li>➤ Áreas mayores de inspección</li> <li>➤ Reducción de tiempos</li> <li>➤ Evalúa todos los procesos de soldadura</li> <li>➤ Profundidad mayor</li> <li>➤ Defectos en tiempo real</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Inspección volumétrica</li> <li>➤ Discontinuidades subsuperficiales y superficiales</li> <li>➤ Reducción de tiempos</li> <li>➤ Evalúa todos los procesos de soldadura</li> <li>➤ Soldaduras en caliente o frío</li> <li>➤ No limitante en la forma de la pieza</li> <li>➤ No requiere acoplante</li> <li>➤ Resultados tiempo real</li> </ul>

## CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN

El proceso de soldadura SAW representa ser el proceso de mayor aplicación para cordones de soldadura longitudinales en la fabricación de tuberías de conducción de hidrocarburos, debido a su alta productividad y grandes volúmenes de metal de aporte que puede alcanzar.

Debido a los factores externos presentes durante la realización de la soldadura, la inspección se debe de realizar en sus tres etapas (antes durante y después de la soldadura) para prevenir problemas y llevar un buen control de calidad de la producción.

La porosidad es la discontinuidad con mayor porcentaje de presencia durante la fabricación de las tuberías debido a los gases atrapados, un mal control de los parámetros, así como una falta de limpieza en la pieza a soldar.

Los END como ultrasonido y radiografía permiten una inspección completa, ya que logran un alcance superficial y subsuperficial brindando resultados instantáneos y permanentes.

Durante la realización del caso de estudio se concluyó que en comparación de un ultrasonido con arreglo de fases contra ultrasonido convencional se puede decir que:

- Hay una mayor velocidad de inspección.
- Una mayor probabilidad de detección, es decir alta sensibilidad al detectar diferentes discontinuidades en una sola inspección.
- El barrido logra mayor área de inspección.

- La visualización de los resultados de la prueba, fácilmente comprensible incluso por los no expertos ya que pueden proporcionar datos en tiempo real.

Siendo el ultrasonido por arreglo de fases, la técnica más óptima para la inspección de soldadura debido a los alcances que logra tener, calidad de resultados, tiempos de operaciones, fácil manejo para interpretación de resultados.

La innovación de los END son las técnicas que no requieren de contacto como el ultrasonido por láser pulsado que permite la obtención de resultados instantáneos en piezas en caliente o frío, lo que equivale una alta productividad en fabricación de tuberías ya que la inspección podría lograrse de manera instantánea.

# BIBLIOGRAFÍA

1. Construcción de una máquina para ensayos de juntas soldadas, 2008. Lenin Xavier Aguirre Revelo. Escuela Politécnica Nacional de Quito.
2. Inspector de soldadura AWS QCI, 2007. Carlos Oliva Minilo. INCHISOL, Instituto Chileno de Soldadura.
3. Estudio de uniones soldadas en aceros microaleados con vanadio laminados en caliente, 2006. Víctor Hugo Ochoa Aviles. Universidad Michoacana de San Nicolás De Hidalgo.
4. Manual de soldadura Oerlikon, 2009.
5. Soldadura. Aplicaciones y prácticas, 2003. Henry Horwitz P.E. Grupo editorial Alfaomega.
6. Specification for line PIPE ANSI-API, 2007.
7. Análisis estructural de la unión soldada con proceso GTAW, sometido a tratamiento térmico, donde el material base es acero inoxidable austenítico y de aporte nitinol. Octubre 2006. Ing. Milton Carlos Elías Espinosa. Instituto Politécnico Nacional "Secretaría de Investigación y Posgrado. México D.F.
8. Uso de tubería de acero al carbono con soldadura helicoidal en la fabricación de oleoductos. Houston, 2011. Ing. Especialista Andrés Eloy Salazar. ZULCON, Colombia.

9. Procesos de soldadura aplicados en la construcción naval, octubre de 2011. José Martín Guivernau. Universidad Politécnica de Catalunya.
10. Tensiones residuales generadas en la zona ZAC y su influencia en la tenacidad a la fractura en los aceros HSLA bajo un proceso de soldadura por arco sumergido, 2009. Aurelio Muñoz Rubio. Escuela Politécnica Superior de Algeciras.
11. Manual de sistemas y materiales de soldadura INDURA. 2010.
12. ANSI/AWS A5.17 Specification for Carbon Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding. 1997. American Welding Society.
13. Inspección y evaluación de discontinuidades en proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) mediante la técnica de ultrasonido con arreglo de fases en aceros al carbono. 2012. Jesús Martínez Salinas.
14. Base defectológica de soldaduras evaluación, caracterización e interpretación radiográfica de soldaduras en materiales metálicos. 2010. D. Antonio Carlos Ortiz Martínez. Universidad politécnica de Cartagena.
15. Soldadura del acero API 5L-X52 mediante el proceso flux cored arc welding (FCAW) con transferencia pulsada. 2001. G González., Juan C. Soriano R., Gregory G. Universidad Central de Venezuela.
16. Defectología. 2002. Ing. Ricardo Echeverría. Universidad Nacional del Comahue 2002.
17. Why we need non-destructive testing of welded constructions. 2013. J.G. Young, J. M. Coffey and R.F. Lumb. J STOR.

18. AWS A3.0 Standard Welding Terms and Definition. 2010. 12<sup>th</sup> American Welding Society.
19. Welding Inspection Technology. 1998 American Welding Society.
20. Ensayos no destructivos como herramienta para el dimensionamiento de discontinuidades en la superficie externa de tuberías. 2010. Edward Yesith Mendoza González Luz Amparo Quintero Ortiz Gerardo Santos Castañeda. UIS Ingeniería.
21. ASM Handbook Volume 17. Nondestructive Evaluation and Quality Control. 1997. American Society For Testing and Materials.
22. Manual de prácticas con ultrasonido modo A, Julio de 2006 Guadalupe Beatriz Flores Loya. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.
23. Manual Llog; (2009); Pruebas no destructivas; Edición 2009; Departamento técnico Llog.
24. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review, 2006. Drinkwater Bruce W., Wilcox Paul D. NDT&E International; 39. Estados Unidos.
25. Manual Phased Array Ultrasonic Technique for Weld Application. December 2009. S. Anandamurugan. GE Inspection Technologies, Bangalore, India.
26. Técnicas de ultrasonido sin contacto. 2004. Robert E. Green Jr. ELSEVIER.

27. Caracterización y evaluación de películas delgadas por las ondas de superficie ultrasónicas inducidas por láser no destructivo. 2011. D, Schneider, M.D. Tucker. EISEVIER.
28. Método de formación de imágenes por propagación láser ultrasónico en el dominio de la frecuencia basado en la transformación de ondas. 27 de Julio de 2010. Jung-Ryul Lee, Chen Ciang Chia, Hye Jin Shin, Chan-Yik Park, Dong Jin Yoon. EISEVIER.
29. Digital radiography for the inspection of weld seams of pipelines – better sensitivity. February 2010. Edson Vasques Moreira, Heleno Ribeiro Simões, José Maurício Barbosa Rabello, José Rubens de Camargo & Marcelo dos Santos Pereira. Engineering faculty of Guaratinguetá, Paulista State University – UNESP, São Paulo, Brazil.
30. ASTM E 94: Standard Guide for Radiographic Examination. 2004. American Society for Testing and Materials.
31. Registration of real-time X-ray image sequences for weld inspection. October 2008. Dong Du, Runshi Hou, Jiixin Shao, Baohua Chang and Li Wang. Department of mechanical Engineer, Tsinghua University.

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Diagrama en el proceso de fabricación de un tubo.	6
<b>Figura 2.2</b> Proceso de Soldadura por Arco Sumergido (SAW).	13
<b>Figura 2.3</b> Equipo de soldadura SAW.	16
<b>Figura 2.4</b> Electrodo (alambre) para soldadura SAW de ¼".	18
<b>Figura 2.5</b> Clasificación de los fundentes según la norma AWS.	18
<b>Figura 2.6</b> Porosidad distribuida uniformemente en la soldadura.	24
<b>Figura 2.7</b> Un tipo de discontinuidad de poros agrupados.	25
<b>Figura 2.8</b> Discontinuidad tipo poros alineados.	25
<b>Figura 2.9</b> Discontinuidad tipo socavado.	26
<b>Figura 2.10</b> Escoria atrapada en la soldadura.	27
<b>Figura 2.11</b> Grieta longitudinal en la soldadura.	30
<b>Figura 2.12</b> Falta de fusión en la soldadura.	30
<b>Figura 2.13</b> Discontinuidad tipo falta de penetración.	31
<b>Figura 2.14</b> Discontinuidad tipo traslape.	32
<b>Figura 2.15</b> Esquema de los tipos de ondas a) longitudinal, b) transversales, c) Lam (placa) y d) superficiales. La longitud de onda, $\lambda$ , es la distancia correspondiente a un ciclo completo.	44
<b>Figura 2.16</b> Detección de una discontinuidad en el método pulso-eco.	48
<b>Figura 2.17</b> Inspección con palpador de haz recto.	49
<b>Figura 4.1</b> Metodología aplicada en el caso de estudio.	64
<b>Figura 4.2</b> Material emplead en el caso de estudio, a) Equipo UT, b) transductor y zapata, c) pieza de inspección, d) glicerina, e) taladro mecánico.	65
<b>Figura 4.3</b> Identificación de las zonas para inspeccionar en la pieza.	66
<b>Figura 4.4</b> Inspección por medio de ultrasonido con arreglo de fases a) en lado A y b) en lado B, observando que en ambos lados de la pieza está libre de cualquier indicación de importancia.	67
<b>Figura 4.5</b> Zona 1 corresponde al metal base, zona 2 correspondiente a la soldadura y, zona 3 es metal base.	67
<b>Figura 4.6</b> Mediante la inspección de las piezas en a) zona 1, b) zona 2 (se nota distorsión en la interfase debido al mal acoplante), c) zona 3, se determinó que la pieza se encuentra libre de discontinuidades y/o defectos.	68
<b>Figura 4.7</b> Con brocas de diámetros de a) 2.59mm, b) con 3.06mm y 3.14mm. Se realizaron perforaciones para inducir discontinuidades en diferentes zonas de la pieza, para ser inspeccionadas con ultrasonido con arreglo de fases.	69
<b>Figura 4.8</b> Inspección del lado A correspondiente a la zona 1, se observa en a) una discontinuidad detectada con el piezoeléctrico número 38, en b) se	

detectaron dos discontinuidades al mismo tiempo, uno con piezoeléctrico 38 y otro con el número 16. 69

**Figura 4.9** Inspección del lado B correspondiente a la zona 2 a) se detectó una discontinuidad con el piezoeléctrico número 47 en la zona de la ley focal, b) detección de 3 discontinuidades con los piezoeléctricos 8, 32, 47. Observando la alta sensibilidad para la detección de diversas discontinuidades en una sola pasada. 70

**Figura 4.10** Se muestra la zona en la interfase de la pieza y el transductor la cual esta distorsionada debido a la formación de burbujas, el acoplante empleado fue glicerina. 70

**Figura 4.11** Pieza con defectos inducidos y detectados. 71

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Clasificación API 5L para aceros al carbono.	10
<b>Tabla 2.2</b> Requerimientos de esfuerzo de tracción de aceros API 5L.	11
<b>Tabla 2.3</b> Composición química de tuberías para PSL 1 de 25 mm (0,984 in).	11
<b>Tabla 2.4</b> Tabulación de la regulación de parámetros para la soldadura en aceros de mediana y baja aleación.	17
<b>Tabla 2.5</b> Discontinuidades comúnmente encontradas en las soldaduras depositadas con diferentes procesos.	23
<b>Tabla 2.6</b> Métodos de END aplicables en la detección de algunas soldaduras.	38
<b>Tabla 2.7</b> Parámetros para inspección ultrasónica.	47
<b>Tabla 2.8</b> Requerimientos de la norma ASME y API para inspección con UT.	52
<b>Tabla 2.9</b> Requerimientos de ASME y API para inspección radiográfica.	60
<b>Tabla 4.1</b> Defectos detectados a diversas profundidades.	71
<b>Tabla 4.2</b> Muestra un comparativo entre los END actuales y los propuestos durante la realización de éste proyecto.	71

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

<b>Nombre</b>	<b>Ángel Gerardo Ramón Gamas</b>		
<b>Grado Máximo de Estudios</b>	Ingeniería Civil		
<b>Educación</b>	<b>Grado</b>	<b>Institución</b>	<b>Fecha</b>
	Certificado	Esc. Primaria Eugenio Amat Moncada	1995 – 2001
	Certificado	Escuela Secundaria Técnica No.10	2001– 2004
	Certificado	Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicio No.93	2004 – 2007
	Trámite de titulación	Instituto Tecnológico de Villahermosa	2007 – 2012
<b>Experiencia profesional</b>	<b>Puesto</b>	<b>Empresa</b>	<b>Fecha</b>
	Ayudante técnico	C.VOBSA S.A de C	2010
<b>Habilidades especiales</b>	Facilidad de manejo de software (Paquetería de office, capacidad de desarrollar proyectos, uso de los equipos GPS, Radio Detection, Holiday prueba de espesores.  Realización de metalografía, manejo del microdurómetro, y facilidad de adaptación		
<b>Actividades Extracurriculares</b>	Música, lectura, natación		