

**ELABORACIÓN DE MUESTRAS SOLDADAS EN T EMPLEANDO TUBERÍA,  
PARA SU EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

**IVÁN DARÍO CHINOME PÉREZ**

**DIEGO PABÓN PABÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2015**

**ELABORACIÓN DE MUESTRAS SOLDADAS EN T EMPLEANDO TUBERÍA,  
PARA SU EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

**IVÁN DARÍO CHINOME PÉREZ**

**DIEGO PABÓN PABÓN**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**Directora**

**INGENIERA METAÚRGICA, MSC. LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ**

**Codirector**

**INGENIERO METALÚRGICO, MSC. JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2015**

*A Dios por guiarme en este camino y bendecirme con dos padres amorosos e inspiradores.*

*A mi madre Bárbara, eres lo más preciado gracias por el apoyo y sacrificio para alcanzar esta meta.*

*A mi padre Angel por ser mi soporte con tus consejos que me llenaron de valores como dedicación, constancia, responsabilidad y perseverancia.*

*Iván D. Chinome.*

*A mi amada novia Karollain por ser mi fuente de paz, energía y felicidad necesarios para el logro de mis metas*

*A mis padres José Pabón Celis y Ana Pabón García por el esfuerzo realizado en mi favor y la enseñanza que me dieron.*

*A mis amigas y amigos, que sin esperar nada a cambio, brindaron su amistad y apoyo.*

*Diego Pabón.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al SENA CIMI por brindarnos sus instalaciones y sus profesionales calificados como el Tecnólogo en Soldadura Cristian Andrés Ordoñez Cárdenas, quien afrontó un suceso difícil y que esperamos le llegue nuestra voz de ánimo para el logro de sus metas y al profesor Hernán Álvarez.

A los directores de este proyecto Luz Amparo Quintero y Julián Orlando Herrera por sus valiosa orientación y compromiso, ustedes forjan profesionales con conocimiento y además con criterio propio para defender sus ideales.

A los profesores Orlando José Gómez, Carlos Andrés Galán, Mauricio Rincón y a los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Domingo, Ambrosio, Mario, Javier y Oscar por la ayuda y acompañamiento brindados.

Nuestro agradecimiento.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	16
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	18
2. OBJETIVOS .....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	21
3.1 PROCESO DE SOLDADURA.....	21
3.2 DISCONTINUIDAD .....	23
3.3 TÉCNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	24
3.4 NORMATIVIDAD APLICADA.....	29
4. METODOLOGÍA.....	30
4.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA. ....	31
4.2 ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	31
4.2.1 Selección de materiales.....	31
4.2.2 Diseño de muestras.....	32
4.2.3 Elaboración de los procedimientos de soldadura. ....	34
4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA, MECÁNICA Y METALOGRAFICA DE LOS MATERIALES.....	34
4.4. ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS. ....	37
4.4.1 Corte y biselado.....	37

4.4.2 Montaje .....	37
4.4.3 Ejecución de la soldadura .....	38
4.5 CARACTERIZACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LAS MUESTRAS.....	43
4.5.2 Comparación con los procedimientos diseñados.....	44
4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
4.7 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.....	44
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	45
5.1 RESULTADO DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA, MECÁNICA Y METALOGRÁFICA .....	45
5.1.1 Resultados de la caracterización física.....	45
5.1.2 Resultados de la caracterización química.....	45
5.1.3 Resultados de la caracterización Mecánica.....	47
5.1.4 Resultado de caracterización Metalográfica .....	48
5.2 RESULTADOS DE ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS .....	49
5.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LAS MUESTRAS.....	50
5.3.1 Resultados del ensayo de Inspección Visual.....	50
5.3.2 Resultados del ensayo de Líquidos Penetrantes .....	52
5.3.3 Resultados del ensayo de Ultrasonido.....	54
5.4 COMPARACIÓN DEL DISEÑO Y LOS RESULTADOS .....	59
6. CONCLUSIONES.....	60
7. RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	64
ANEXOS.....	66

## LISTA TABLAS

	pag.
Tabla 1. Identificación de los electrodos E6010, E7018 y Citodur600.....	23
Tabla 2. Conceptos asociados a las discontinuidades.....	24
Tabla 3. Discontinuidades comunes del proceso de soldadura.....	25
Tabla 4. Clasificación de Líquidos Penetrantes tipo y métodos, según norma ASTM E165-95.....	26
Tabla 5. Aplicabilidad de las distintas técnicas de END.....	29
Tabla 6. Descripción general de las muestras fabricadas.....	33
Tabla 7. Defectos a inducir en las muestras.....	34
Tabla 8. Procedimiento de soldadura básico para muestra Tipo I.....	36
Tabla 9. Procedimiento de soldadura básico para muestra Tipo II.....	37
Tabla 10. Factores alterados en el proceso de soldadura para obtención de los defectos.....	41
Tabla 11. Normas aplicadas para desarrollo y evaluación de los END.....	44

Tabla 12. Ensayos aplicados a cada muestra.....	46
Tabla 13. Resultados de la caracterización física.....	47
Tabla 14. Resultados análisis elemental por Espectrometría de Emisión Óptica y composición química de los aceros según ASTM.....	47
Tabla 15. Dureza y resistencia a la tracción del metal base.....	48
Tabla 16. Análisis de microestructura de los materiales base.....	49
Tabla 17. Indicaciones obtenidas por Inspección Visual en muestra 7.....	52
Tabla 18. Indicaciones obtenidas por Líquidos Penetrantes para muestra 7.....	54
Tabla 19. Cálculos operativos para inspección con zapata 70°.....	56
Tabla 20. Indicaciones de inspección por ultrasonido para la muestra 7.....	57

## LISTA FIGURAS

	pág.
Figura 1. Partes del proceso SMAW.....	22
Figura 2. Secuencia de operaciones para la inspección por líquidos penetrantes.....	28
Figura 3. Esquema de la metodología seguida en el proyecto de estudio.....	30
Figura 4. Procedimiento de corte, biselado y montaje de las muestras.....	38
Figura 5. Procedimiento de ejecución de soldadura en las muestras.....	39
Figura 6. Ejemplos de muestras Tipo I y II fabricadas.....	49
Figura 7. Indicaciones Halladas por IV en la muestra 7.....	52
Figura 8. Indicaciones Halladas por LP en la muestra 7.....	54
Figura 9. Equipos usados en la inspección por ultrasonido.....	54
Figura 10. Verificación de discontinuidad hallada en el tubo de derivación para muestra.....	57

## LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN PARA END.....	66
Anexo B. CRITERIOS USADOS PARA EVALUACIÓN POR END, SEGÚN ASME SECCIÓN VIII DIVISIÓN 2.....	67
Anexo C. RESULTADOS DE LAS INSPECCIONES POR END REALIZADAS A TODAS LAS MUESTRAS.....	70

## RESUMEN

**TÍTULO:** ELABORACIÓN DE MUESTRAS SOLDADAS EN T EMPLEANDO TUBERÍA, PARA SU EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS\*

**AUTORES:** PABÓN PABÓN, Diego y CHINOME PÉREZ, Iván Darío\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Soldadura, Ensayos No Destructivos, Patrones de Entrenamiento.

### DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo fabricar muestras con uniones tipo T en tubería para el entrenamiento en Ensayos No Destructivos. Estas muestras servirán para la enseñanza y capacitación de estudiantes y personal interesado en la inspección de soldaduras.

Para fabricar las muestras, se realizó una recopilación bibliográfica sobre los patrones de entrenamiento para ensayos no destructivos, para luego diseñar una metodología que permita conseguir los objetivos planteados.

La metodología incluye la selección del material apropiado, como también de los defectos internos y superficiales típicos de la soldadura, la elaboración de un procedimiento de soldadura y factores que predisponen la generación de defectos, esto acompañado de la caracterización del material empleado y de los defectos obtenidos.

Finalmente, fue posible lograr las muestras diseñadas ya que los defectos planteados fueron encontrados en las inspecciones con ensayos no destructivos, obteniendo tamaños críticos para estos y encontrando otras indicaciones generadas por la alteración de las condiciones de soldeo, estas indicaciones se originaron de manera no intencional durante el proceso y no representan una criticidad muy alta, concluyendo que el diagnóstico de las muestras resulta interesante, pues se encuentran variedad de indicaciones que exigen habilidades teóricas y prácticas del inspector para interpretar las indicaciones.

---

\*Trabajo de Grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Directora: MSC. Luz Amparo Quintero Ortiz.

## ABSTRACT

**TITLE:** MANUFACTURE OF WELDED SAMPLES T FORM USING PIPE, FOR EVALUATION BY NON-DESTRUCTIVE TESTING.

**AUTORS:** PABÓN PABÓN, Diego and CHINOME PÉREZ, Iván Darío\*\*

**KEY WORDS:** Weld, Non Destructive Testing, Training Specimens.

### DESCRIPTION:

The present paper had as an objective to fabricate specimens with T unions in piping for the training of Non Destructive Testing. These specimens will serve to teach and capacitate students and personnel interested in the inspection of welding.

To fabricate the samples, a bibliographical compilation about the patterns of training of non-destructive testing was done, to later to design a methodology to obtain the planned objectives.

The methodology includes the selection of appropriate material, too the internal and superficial typical defects in the welding and the factors that predispose of the creation of these defects, this accompanied by the characterization of the used material and the obtained defects.

Finally, it was possible to obtain the designed specimens, since the planned defects were found in the inspection of non-destructive testing, obtaining critical sizes for these and finding indications generated due to the alteration in the conditions of the welding, these indications were generated in a non-intentional manner during the process and not present critical dimensions, concluding with the diagnostics of the specimes results interesting, because of the finding of various indications that require theoretical and practical abilities from the inspector to interpret the indications.

---

\*Work Degree.

\*\*Faculty of Physic Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Science of Materials, Director: MSC. Luz Amparo Quintero Ortiz.

## INTRODUCCIÓN

Los ensayos no destructivos (END) deben su existencia al diagnóstico de calidad y seguridad de un material, por medio de estos se puede controlar el tiempo de vida útil de una pieza, estructura o equipo. La persona encargada de aplicarlos debe demostrar el conocimiento teórico y las habilidades prácticas para realizar e interpretar los resultados de la inspección no destructiva, estas habilidades las adquiere con el entrenamiento, mediante el cual la persona en etapa de aprendizaje se apropia de los conceptos recibidos durante sus estudios y los aplica en la evaluación de piezas diseñadas para poner a prueba sus conocimientos.

Las piezas sobre las que se entrenan a los inspectores han sido elaboradas para ofrecer cierta complejidad en su diagnóstico, por lo que tienen defectología variada tanto en el interior como en la superficie de la pieza, con diferente forma y con el propósito de poner a prueba la capacidad de identificar y analizar las indicaciones obtenidas de la técnica no destructiva, así como el manejo adecuado de los equipos y herramientas utilizados. Por lo cual, estas piezas se deben fabricar con procesos especiales en los que se obtengan defectos identificables al aplicar el ensayo apropiado.

El presente proyecto se realizó con el fin de fabricar muestras soldadas usuales en tubería. Las muestras serán útiles en el laboratorio de END para enseñanza de las técnicas de inspección a los estudiantes de la materia y para entrenamiento o capacitación de personal que desee adquirir habilidades a través de la práctica en las muestras.

Para fabricar las muestras se establece un diseño acorde a la normativa internacional, que implica la selección apropiada del material, de un soldador con las habilidades necesarias, la elaboración de la especificación del procedimiento de soldadura (WPS) y el análisis de factores para originar defectos en la soldadura, además los métodos para identificar y caracterizar la defectología obtenida fueron los END.

Se obtuvo las muestras con la defectología propuesta, a las cuales es posible encontrar indicaciones del proceso de soldadura ubicadas tanto en el interior como en la superficie de la soldadura, estas se encuentran de formas lineal, redondeadas, planares y volumétricas, para llevar al inspector a un análisis de los criterios que le permitan evaluar relevancia y criticidad de las indicaciones para generar el diagnóstico.

## 1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El tubo de acero soldado es usado en múltiples procesos industriales como en: fábricas, centrales generadoras, refinerías, cumpliendo la función de transporte de fluidos como agua, vapor, químicos, gases, petróleo, material radioactivo, aceites. Luego, es entendible que el soldador de tubo sea considerado como el más experimentado y el de mejor calidad en la industria [1].

Debido a lo anterior, se convierte en un tema de amplio interés el estudio de las uniones soldadas, para garantizar, el buen funcionamiento del transporte de productos valiosos. Por esto, el control de calidad de la soldadura y la evaluación de su defectología, por métodos no destructivos es fundamental.

Disponer de personal calificado y certificado en los procesos de soldadura y de inspección en ensayos no destructivos, es necesario en la construcción de las líneas de tuberías para transporte de fluidos. Esto hace más eficientes y competitivas a las industrias, al tener confiabilidad y seguridad en sus procesos, además de proteger el medio ambiente, evitando posibles fallos, con consecuencias económicas adicionales.

La preparación de personal en ensayos no destructivos se logra mediante entrenamiento de éste sobre patrones o muestras con defectología típica. El proceso de elaboración de estas muestras implica múltiples factores como: el diseño de un procedimiento, las propiedades de los materiales involucrados, el proceso de soldadura, las causas que generan los defectos, y el conocimiento de las normas técnicas nacionales e internacionales.

Además de lo anterior, disponer de equipos y personal apropiado para generar muestras con la defectología requerida, contribuyen a la complejidad y el costo que conlleva la fabricación de las probetas. Debido a esto, éstas alcanzan altos precios en el mercado, llegando a costar un kit de probetas entre 2000 a 5000 dólares incluyendo costos de importación.

Por todo lo anterior, se propuso desarrollar muestras soldadas empleando tubería con defectos típicos seleccionados, que sirvan para la enseñanza y el entrenamiento de personal en el área de Ensayos No Destructivos (END).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar muestras soldadas en T empleando tubería de acero al carbono, para su evaluación mediante Inspección Visual, Líquidos Penetrantes y Ultrasonido.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fabricar las muestras soldadas, con defectología inducida seleccionada, a partir del diseño del respectivo procedimiento.
- Caracterizar mediante ensayos no destructivos los defectos inducidos en las muestras para compararlos con los diseños.
- Evaluar las muestras fabricadas y la defectología presente según normas técnicas aplicables.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

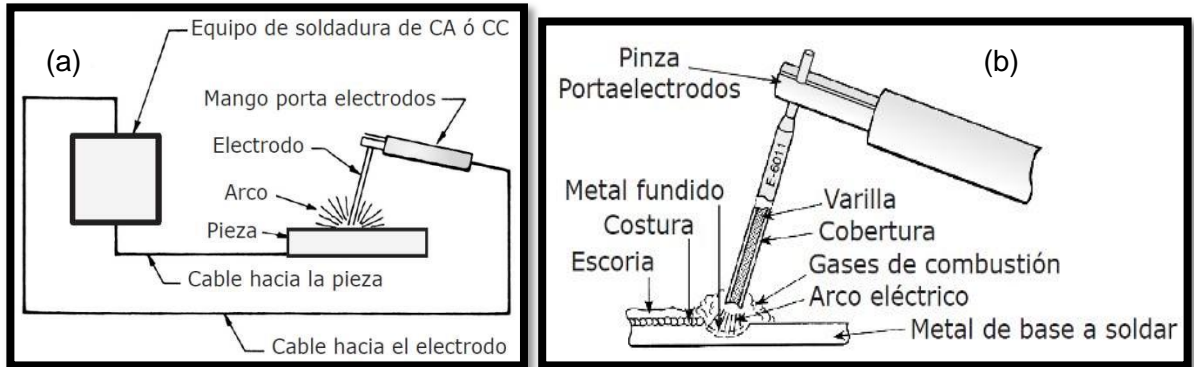
En el desarrollo del proyecto, se estudiaron conceptos para complementar la investigación y realizar el análisis de los resultados. En este capítulo se presentan aspectos relacionados con el proceso de soldadura, las discontinuidades asociadas a este y algunas de sus causas, luego se presentan, las técnicas de detección y evaluación, conocidas como ensayos no destructivos (END) con la normatividad aplicada.

#### 3.1 PROCESO DE SOLDADURA

La soldadura es un proceso mediante el cual se logra la unión de dos materiales conocidos como metal base, con material de aporte agregado entre ellos, o mediante su fusión. Este proceso a veces implica unión por medio presión y la formación de un baño líquido que al solidificarse da la junta soldada. La composición química, tamaño de grano y espesor de la pieza son variables esenciales para un exitoso proceso de soldadura. A continuación se describe uno de los procesos más usados y que fue empleado en el proyecto.

3.1.1 Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (*SMAW*). En este proceso se produce un arco eléctrico entre el material base y un electrodo revestido, generando calor entre estos fundiendo el metal, el proceso es protegido por una cubierta gaseosa proveniente del revestimiento y el fundente que aísla el cordón durante la solidificación. Es un proceso ampliamente usado por su versatilidad de trabajo y practicidad de montaje, tiene como ventaja su aplicación en sitios donde el viento corre con alta velocidad. En la Figura 1 se muestran el montaje y partes que interviene en el proceso.

Figura 1. Partes del proceso SMAW: a. Circuito básico para soldar por arco eléctrico. b. Esquema del proceso de soldadura con electrodo revestido.



Fuente: Pedro Claudio Rodríguez [2]

El electrodo apropiado se escoge, considerando disponibilidad de corriente alterna o continua, composición del metal base, posición de soldadura y requerimientos en servicio de la junta soldada [3]. Una buena selección de electrodo permite una buena estabilidad de arco, un cordón con buena presentación, buena velocidad de depósito, escasez de proyecciones, máxima resistencia y fácil eliminación de escoria [4]. En la Tabla 1, se presenta las características que identifican los electrodos E6010, E7018 y Citodur 600.

Tabla 1. Identificación de los electrodos E6010, E7018 y Citodur 600.

Identificación Electrodo	Resistencia a la tracción	Posición de soldadura	Otras características	Ventajas
<b>E 6010</b>	Resistencia a la tracción de 60000 Psi	Todas las posiciones de soldadura	Revestimiento a base de celulosa	Buena penetración. Resistencia al choque térmico
<b>E 7018</b>	Resistencia a la tracción de 70000 Psi	Todas las posiciones de soldadura	Bajo contenido de Hidrogeno	Buena presentación. Resistencia al choque térmico
<b>Citodur 600</b>	No especificada	Posición horizontal y cornisa	Deposito compuesto de Carburos de Cromo	Buena resistencia a la abrasión y elevada dureza

### 3.1 DISCONTINUIDAD

Es una falta de continuidad o unión en una superficie, parte física de un material o montaje, que se presenta como interrupción intencional o no intencional en la estructura del material, estas se pueden aparecer en cualquier momento de la vida de una pieza metálica. En la Tabla 2 se presenta la información asociada a las discontinuidades para su mejor comprensión indicando su tipo, ubicación, forma, e importancia.

Tabla 2. Conceptos asociados a las discontinuidades.

<b>DISCONTINUIDADES</b>			
<b>Tipo de discontinuidades</b>			
<b>Inherente</b>	<b>Proceso</b>	<b>Servicio</b>	
Si la discontinuidad se crea durante la fabricación, en la solidificación.	Si la discontinuidad aparece por procesos de manufactura o terminado final de la pieza.	Si la discontinuidad se produce durante el uso, por ejemplo corrosión, sobrecarga, o una combinación.	
<b>Ubicación de discontinuidades</b>			
<b>Interna</b>		<b>Superficial</b>	
Se encuentra dentro del material		Se encuentra en la superficie del material	
<b>Forma de indicación[5]</b>			
<b>Volumétrica</b>	<b>Plana</b>	<b>Lineal</b>	<b>Redonda</b>
Si tienen tres dimensiones	Si son delgadas en una dimensión y grandes en las otras dos.	Si su longitud es mayor que tres veces su ancho.	De forma elíptica o circular y cuya longitud es igual o menor que tres veces su ancho.
<b>Tipos de indicaciones</b>			
<b>Relevantes</b>	<b>No Relevantes</b>	<b>Falsas</b>	
Comprometen la aptitud de la pieza en servicio.	No afectan la aptitud de la pieza en servicio pero se deben notificar para su control.	Causadas por parámetros de funcionamiento de los equipos, o fallas de procedimiento.	

3.2.1. Tipos de discontinuidades en la soldadura. Durante el proceso de soldadura se pueden generar discontinuidades, algunas de las más comunes se presentan en la Tabla 3 [6].

Tabla 3. Discontinuidades comunes del proceso de soldadura.

<b>Discontinuidad</b>	<b>Causa</b>
<b>Grietas</b>	Producidas ya sea por esfuerzos de contracción durante la solidificación, por humedad del electrodo, como por esfuerzos residuales en la pieza.
<b>Porosidades</b>	Al realizar la soldadura el gas queda en forma de burbujas en el baño hasta solidificarse, aparece por una técnica de soldadura inadecuada.
<b>Inclusiones de Escoria</b>	Inclusiones que quedan atrapadas en el metal de la soldadura, entre los cordones de la soldadura o entre la soldadura y el metal base, debido a mala limpieza.
<b>Falta de Penetración</b>	El metal de soldadura no llega hasta la raíz del cordón, debido a técnica deficiente de soldeo, falta de corriente o inadecuada separación entre la junta a soldar.
<b>Falta de Fusión</b>	Falta de unión entre capas de cordones o con el metal base, aparece por mala posición del electrodo, una técnica inadecuada de soldeo, o disminución de amperaje.
<b>Socavado</b>	Ranura sin rellenar a un lado del cordón y sobre el metal base, por inapropiada manipulación del electrodo, exceso de calor o electrodo inadecuado.
<b>Cordón irregular</b>	Cordón de aspecto disforme, originado por mal empalme, movimiento incorrecto del electrodo o alteración de un parámetro de soldadura.
<b>Salpicadura</b>	Esferillas de metal fundido depositada aleatoriamente sobre el cordón y su vecindad.
<b>Concavidad</b>	Insuficiente metal de aporte y refuerzo de cordones en primero y último pase, disminuyendo su espesor al enfriar.
<b>Huellas de Mecanizado</b>	Marcas producidas por herramientas, en la preparación o limpieza de la soldadura.

### 3.3 TÉCNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Se conocen como ensayos no destructivos a una serie de pruebas aplicables a materiales cerámicos, poliméricos y metales que buscan detectar

discontinuidades sin afectar el funcionamiento y propiedades iniciales del elemento inspeccionado.

Estos ensayos se basan en principios físicos, químicos y la interacción de las diferentes propiedades de los materiales con estos fenómenos, como ejemplo la respuesta de materiales elásticos ante perturbaciones de ondas ultrasónicas. Además de las diversas características que estos presentan, se pueden destacar importantes usos en el estudio de materiales como medición de espesores, detección de discontinuidades, medición de densidades y medición de propiedades. Los ensayos no destructivos empleados en el presente proyecto son:

3.3.1 Inspección visual. Es un ensayo no destructivo, usado para inspección superficial de piezas, se basa en las propiedades de la luz y leyes de la óptica. Por lo cual, para la aplicación de la técnica, debe contarse con iluminación, luminancia e intensidad de luz adecuados y debe revisarse la agudeza visual del inspector periódicamente.

La aplicación de la inspección visual proporciona grandes ventajas en la cadena de fabricación, pues frecuentemente detecta imperfecciones evitando problemas en etapas subsecuentes del proceso [7]. Aunque la técnica está limitada a evaluación superficial de materiales opacos a la luz blanca y cuerpos transparentes, se obtienen importantes beneficios cuando se usa instrumentación auxiliar como lupas y endoscopios.

3.3.2. Inspección por líquidos penetrantes: Esta técnica permite la detección de discontinuidades superficiales abiertas a la superficie en materiales no porosos,

en metales, cerámicos, plásticos, donde pueden encontrarse discontinuidades planares como grietas de fatiga y volumétricas como porosidad [8]. Como principio físico de este método están, la alta capilaridad del penetrante que determina la capacidad para entrar en las discontinuidades ubicadas en orientaciones distintas, la baja tensión superficial que es la fuerza que ejerce la superficie del penetrante, la baja viscosidad del penetrante que es la resistencia al deslizamiento de este. Se usan penetrantes que presentan fluorescencia bajo luz ultravioleta y otros coloreados que asemejan tinturas por lo general de color rojo [9]. En la Tabla 4 se presenta la clasificación de los líquidos penetrantes según American Society for Testing Materials ASTM.

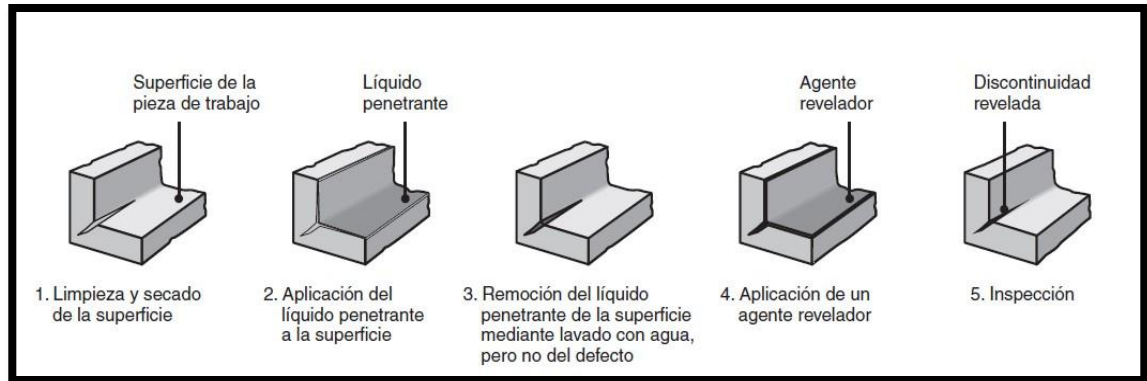
Tabla 4. Clasificación de Líquidos Penetrantes tipo y métodos, según norma ASTM E165-12 [10].

<b>Tipo I Fluorescente</b>	
Método A	Lavable con agua (ASTM E1209)
Método B	Postemulsificable lipofilico (ASTM E1208)
Método C	Removible con solvente (ASTM E1219)
Método D	Postemulsificable hidrofílico (ASTM E1210)
<b>Tipo II Coloreados</b>	
Método A	Lavables con agua (ASTM E1418)
Método C	Removibles con solvente (ASTM E1220)

Fuente: ASTM International.

La aplicación de los líquidos penetrantes consta principalmente de cinco pasos como se ilustra en la Figura 2, en líquidos penetrantes más que en ninguna técnica de inspección no destructiva requiere una limpieza previa minuciosa del elemento a evaluar, pues la capacidad del penetrante para mostrar las discontinuidades se ve afectada severamente por suciedad, grasa y residuos.

Figura 2. Secuencia de operaciones para la inspección por líquidos penetrantes.



Fuente: ASTM International.

3.3.3 Inspección Ultrasónica. Técnica que permite detectar discontinuidades subsuperficiales e internas de tipo volumétricas y planares, con mayor sensibilidad para estas últimas. “En esta técnica, una onda ultrasónica viaja a través del material. Los defectos (como grietas) interrumpen la onda y reflejan parte de la energía ultrasónica. La amplitud de la energía reflejada y el tiempo requerido para su retorno indican la presencia y ubicación de cualquier defecto en la pieza de trabajo” [11].

El ultrasonido se basa en la propagación de ondas elásticas, las cuales se generan debido al efecto piezoeléctrico de un cristal de cuarzo o transductor que compone los palpadores, el cual permite transformar un pulso eléctrico en mecánico y viceversa. La mayoría de las inspecciones se realizan en un intervalo de frecuencias de 1 a 25 MHz. Para transmitir las ondas ultrasónicas del transductor a la pieza de prueba se utilizan acoplantes; los más comunes son agua, aceite, glicerina y grasa [12].

El ultrasonido se utiliza en campos como soldadura, para identificar defectos en los cordones, en fundición para detectar rechupes o analizar propiedades metalúrgicas, en forja, y en nuevos materiales donde se le ha encontrado aplicación [13]. Como ventaja de la utilización de ultrasonido se tiene la variedad de materiales que se pueden evaluar, y el amplio rango de sensibilidad para identificar y evaluar defectos con el cambio de transductores y condiciones del ensayo.

Finalmente como conclusión a los END presentados, se puede decir que las distintas técnicas brindan alternativas para la detección de defectos según las necesidades, como se muestra en la Tabla 5. El uso de un ensayo no excluye la aplicación de otro, por el contrario, se pueden complementar logrando una mejor caracterización de discontinuidades en la pieza de estudio.

Tabla 5. Aplicabilidad de las distintas técnicas de END.

<b>Método</b>	<b>Detecta defectos</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>Radiografía</b>	Internos	Soldaduras y fundiciones	Metales de espesores mayores a 40 mm
<b>Ultrasonido</b>	Internos	Soldaduras y forjados	Materiales con alta atenuación
<b>Partículas Magnéticas</b>	Superficiales Subsuperficiales	Materiales ferromagnéticos	Materiales no magnéticos y defectos internos
<b>Líquidos Penetrantes</b>	Superficiales	Metales y no metálicos	Defectos internos y materiales porosos
<b>Inspección Visual</b>	Superficiales y Subsuperficiales en translucidos	Materiales opacos a la luz blanca y translucidos	Alto grado de subjetividad

Fuente: RODRÍGUEZ GONZALEZ., Cristina [14].

### 3.4 NORMATIVIDAD APLICADA

Existe variedad de normas que son publicadas por asociaciones con carácter global, cuyo fin, es reglamentar los procedimientos y su evaluación en las diferentes áreas de la industria e investigación. Las normas contienen, especificaciones, códigos, pruebas, definiciones, etc., que han sido creadas dentro de las asociaciones, por personas especializadas en los diferentes campos de la industria, por lo tanto, se genera un carácter de confianza y universalidad para su aplicación en cualquier ámbito de trabajo.

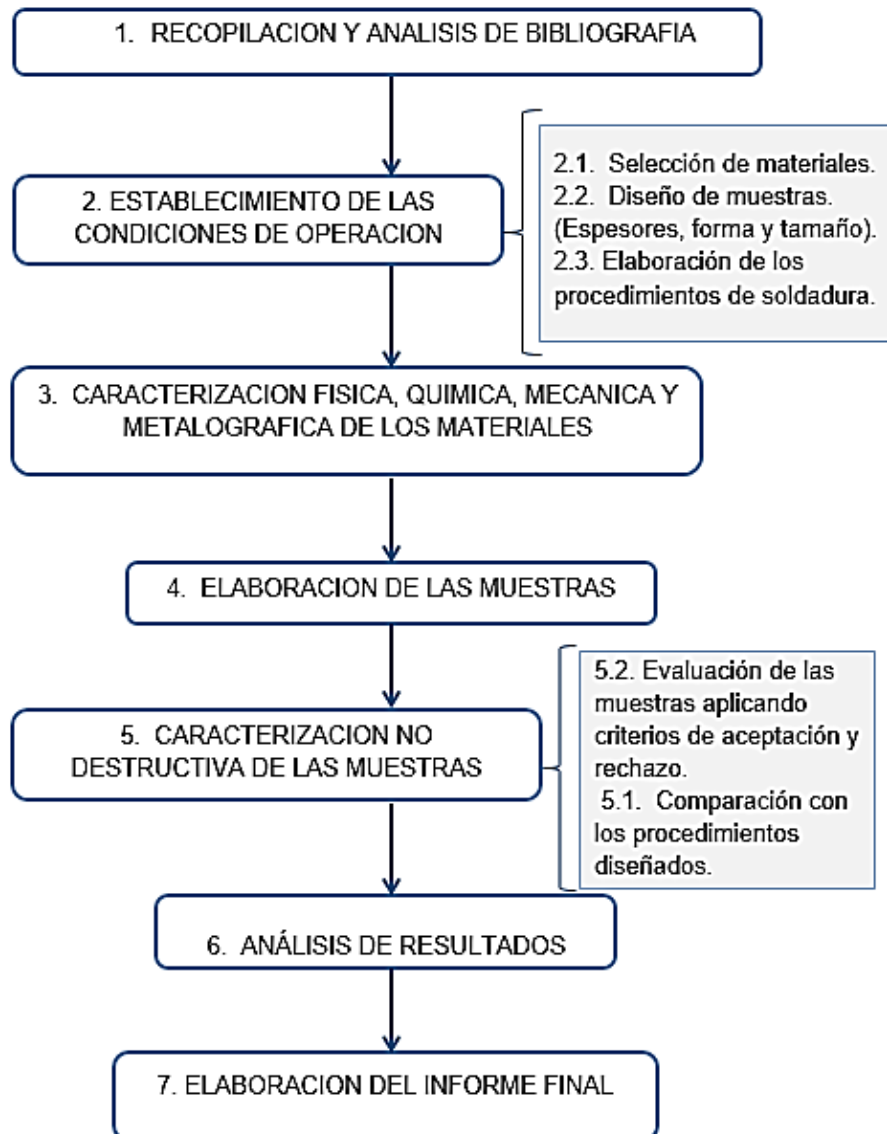
Algunas de las asociaciones encargadas de producir la normativa aplicada en el presente trabajo, relacionada a aceros, soldadura y ensayos no destructivos, son:

- ASTM: American Society for Testing Materials, Asociación dedicada al desarrollo de normas en la aplicación de pruebas en materiales, entre ellos aceros, como también su clasificación y especificación, de acuerdo a su forma (láminas, barras, tubos) o aplicaciones.
- ASME: American Society of Mechanical Engineers, Asociación que ha desarrollado códigos de diseño, fabricación, e inspección, en equipos y recipientes a presión y calderas.
- AWS: American Welding Society, Asociación que promulga normas y códigos relacionados a la soldadura, como la fabricación, procedimientos, técnicas y elementos, vinculados con piezas soldadas.

## 4. METODOLOGÍA

En la Figura 3 se presenta el esquema de la metodología llevada a cabo en la investigación y enseguida se hace una breve descripción de las etapas desarrolladas en el orden de ejecución:

Figura 3. Esquema de la metodología seguida en el proyecto de estudio.



#### 4.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA

Esta etapa fue realizada durante todo el desarrollo del trabajo y en ella se recolectó y analizó de fuentes bibliográficas como: libros, trabajos de grado, tesis, normas técnicas, y artículos científicos, en temas relacionados con los ensayos no destructivos, procesos de soldadura, causas y generación de defectos en soldadura, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo del proyecto y la interpretación adecuada de los resultados.

#### 4.2 ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

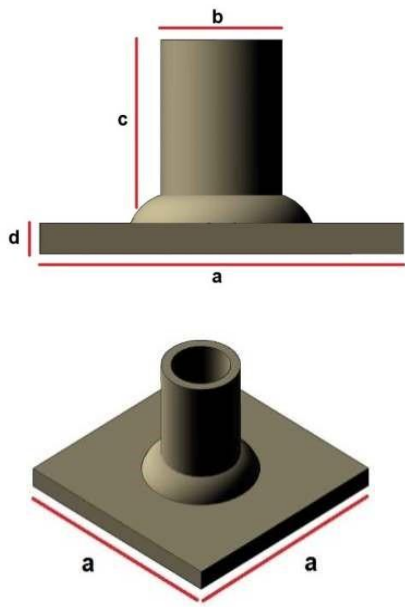
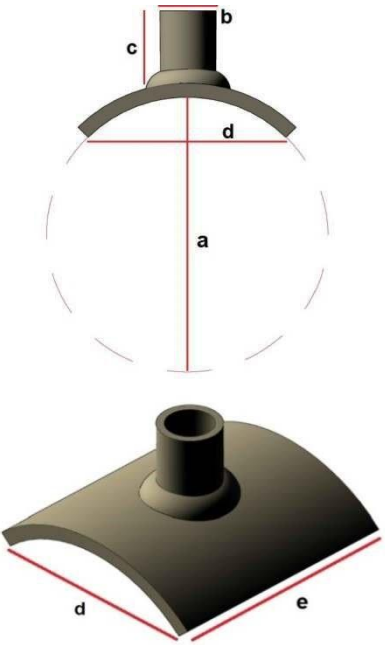
En esta etapa se llevaron a cabo tres actividades: selección de materiales, diseño de muestras y elaboración de los procedimientos de soldadura.

4.2.1 Selección de materiales. A partir de la bibliografía consultada, se determinó elaborar muestras con base plana denominadas Tipo I y con base curva denominadas Tipo II. Se seleccionó como material base para las muestras indicadas, láminas de acero ASTM A36 y ASTM A283, con una derivación a 90° de tubería de acero ASTM A106, como se observa en la Tabla 6. Los materiales anteriormente mencionados se seleccionaron atendiendo a sus bajos costos, versatilidad y aplicación a la industria.

A partir del material base se escogió el metal de aporte teniendo en cuenta lo señalado en la especificación AWS A5.1 para acero bajo en carbono, seleccionando los electrodos: E-7018 Wis 18S, E-6010 Zip 10T.


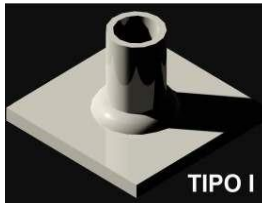
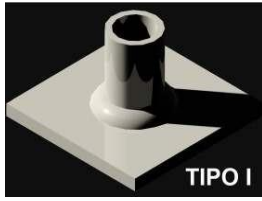


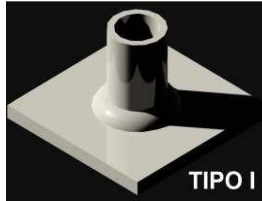
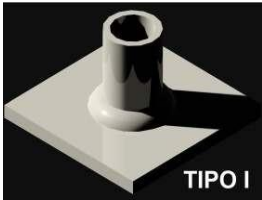

4.2.2 Diseño de muestras. En esta actividad se definieron la cantidad, forma y dimensiones de las muestras a elaborar, en cuanto a la cantidad de muestras se determinó fabricar cuatro muestras Tipo I y cuatro Tipo II. Detalles de la geometría y dimensiones de estos especímenes se presentan en la Tabla 6. Es importante indicar que en el caso de la muestra Tipo II se realizó un proceso de rolado, para dar a la lámina curvatura de tubería de 508 mm (20") de diámetro.

Tabla 6. Descripción general de las muestras a fabricar.

	TIPO	
	I	II
<b>Forma</b>		
<b>Dimensiones</b>	a = 300mm; b = 100mm c = 120mm; d = 9.52mm	a= 508 mm; b= 100 mm c= 150 mm; d= 360 mm e= 400 mm
<b>Material</b>	<u>Base:</u> Lamina acero A36. Espesor: 9.525 mm (3/8") <u>Derivación a 90°:</u> Tubo de acero A106. Diámetro nominal: 101.6 mm (4"). Espesor: 6.35 mm (1/4")	<u>Base:</u> Lámina de acero A283 rolada. Espesor: 12,70 mm (1/2") <u>Derivación a 90°:</u> Tubo de acero A106. Diámetro nominal: 101,60 mm (4"). Espesor: 6,35 mm (1/4")

En cuanto a los defectos a inducir en las muestras, se seleccionaron algunos típicos tanto internos como externos, de tal manera que las muestras se pudieran utilizar para la aplicación de técnicas de evaluación tanto superficial como interna. En la Tabla 7 se presentan las muestras Tipo I y II con la distribución de defectos típicos seleccionados.

Tabla 7. Defectos a inducir en las muestras

Muestra		Defectos Inducidos	Muestra		Defectos Inducidos
1		Sin defectos (muestra patrón)	5		Inclusión de escoria Porosidad (interna)
2		Falta de penetración Falta de fusión (interna) Falta de fusión (superficial)	6		Porosidad (superficial) Falta de fusión (superficial) Socavación
3		Falta de penetración Falta de fusión (interna) Falta de fusión (superficial)	7		Falta de fusión (interna) Porosidad (superficial)
4		Socavación Falta de fusión (superficial)	8		Porosidad (interna) Grieta (interna) Inclusión de escoria

La identificación numérica dada a las ocho muestras, hace referencia al orden de elaboración seguido en el proceso de fabricación. Se tomó como muestra de referencia la muestra número 1, Tipo II por ser aquella la de mayor complejidad geométrica.

4.2.3 Elaboración de los procedimientos de soldadura. En esta actividad se elaboró un WPS básico, reuniendo los parámetros para realizar el proceso de soldadura. En la etapa de elaboración de las muestras, se presentan modificaciones a los WPS, con el fin de conseguir el objetivo de generar los defectos planteados en la actividad anterior. En las Tablas 8 y 9 se presentan los WPS básicos para las muestras Tipo I y II respectivamente.

#### 4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA, MECÁNICA Y METALOGRAFÍA DE LOS MATERIALES

En esta etapa se llevó a cabo la caracterización física, química, mecánica y metalográfica de los materiales base.

La caracterización física consistió en la verificación del espesor de la lámina, y de la integridad superficial de las láminas y tubos. En la caracterización química, se evaluó la composición elemental, por medio del ensayo de espectrometría de emisión óptica. En cuanto a las propiedades mecánicas, se realizó la evaluación de la dureza y se estimó a partir de ella la resistencia a la tensión del material, comparándose con lo indicado en la literatura para los respectivos aceros. Adicionalmente, se realizó análisis metalográfico del material de las láminas y el tubo. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

Tabla 8. Procedimiento de soldadura básico para muestra Tipo I.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)							
Nombre de la compañía: Universidad Industrial de Santander				Por: Diego Pabón Pabón. Iván Darío Chinome Pérez.			
Especificación de Procedimiento No.: 1				Fecha: 10/10/2014			
Proceso Soldadura: SMAW				Tipo: Manual			
JUNTAS:				DETALLES:			
Diseño de la Junta: Bisel en Filete media V a 30°, con Apertura de raíz de 3.17mm (1/8").							
Respaldo: No Material de Respaldo: N.A. Tipo Respaldo: N.A.							
METALES BASE:				METALES DE RELLENO:			
Especificación: ASTM A106 y ASTM A36				Especificación: AWS A5.1			
Tipo: Tubo y Lamina				Clase: AWS E 6010 y 7018			
Tamaño/Diámetro Nominal: 300x300mm/101.6mm				Diámetro: 1/8" (3.175 mm)			
Rango de espesor de metal base: 6.35-9.5 mm				Rango de espesor de soldadura: 10-13mm			
Ranura: N.A. Filete: X							
Rango de diámetros de la tubería: 101.6mm (4")							
CARACTERISTICAS ELECTRICAS:				TÉCNICA:			
Para E6010: Corriente: Continua; Polaridad: Inversa; Intensidad: 70-120 A; Tensión: 18V-24V				Cordoneado y oscilación máxima de 1,5 veces el diámetro del electrodo.			
Para E7018: Corriente: Continua; Polaridad: Inversa; Intensidad: 100A - 145 A; Tensión: 18V-24V.				Limpieza inicial y entre pasadas con disco acero trenzado y disco de pulidora.			
Pase de soldadura	Proceso	Metal de relleno		Corriente		Rango de tensión	Rango de velocidad de avance
		Clase	Diám.	Tipo y polaridad	Rango Amperaje		
1	SMAW	E6010	1/8"	C.C.- E.P	70-80	18-24	Normal
2	SMAW	E7018	1/8"	C.C.- E.P	110-130	18-24	Normal
3	SMAW	E7018	1/8"	C.C.- E.P	110-130	18-24	Normal
4	SMAW	E7018	1/8"	C.C.- E.P	110-130	18-24	Normal
Observaciones:			Precalentamiento:			Aceptación:	
Se realizaron cambios durante el procedimiento por propósitos investigativos, los cambios se indican en la etapa de elaboración de muestras.			-No se realizó al material. -Se realizó para el electrodo E7018 WIS 18S, en horno de electrodos OVELMA.			Diego Pabón Pabón Iván Darío Chinome Pérez	

Tabla 9. Procedimiento de soldadura básico para muestra Tipo II.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)							
Nombre de la compañía: Universidad Industrial de Santander				Por: Diego Pabón Pabón. Iván Darío Chinome Pérez.			
Especificación de Procedimiento No.: 2				Fecha: 10/10/2014			
Proceso Soldadura: SMAW				Tipo: Manual			
JUNTAS:				DETALLES:			
<p>Diseño de la Junta: Bisel en Filete media V a 30°, con Apertura de raíz de 3.17mm (1/8"). Trazado y desarrollo sobre la derivación (boca de pescado).</p> <p>Respaldo: No Material de Respaldo: N.A. Tipo Respaldo: N.A.</p>							
<p>METALES BASE:</p> <p>Especificación: ASTM A106, ASTM A283 Tipo: Tubo y Lamina (proceso de rolado) Tamaño/Diámetro Nominal: 360x400mm/101.6mm Rango de espesor metal base: 6.35-12.7 mm Ranura: N.A. Filete: X Rango de diámetros de la tubería: 4" – 20"</p>				<p>METALES DE RELLENO:</p> <p>Especificación: AWS A5.1 Clase: AWS E 6010 y 7018 Diámetro: 1/8" (3.175 mm) Rango de espesor de soldadura: 10-13mm</p>			
<p>CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS:</p> <p><i>Para E6010:</i> Corriente: Continua; Polaridad: Inversa; Intensidad: 70-120 A; Tensión: 18V-24V <i>Para E7018:</i> Corriente: Continua; Polaridad: Inversa; Intensidad: 100A - 145 A; Tensión: 18V-24V.</p>				<p>TÉCNICA:</p> <p>Cordoneado y oscilación máxima de 1,5 veces el diámetro del electrodo. Limpieza inicial y entre pasadas con disco acero trenzado y disco de pulidora.</p>			
Pase de soldadura número	Proceso	Metal de relleno		Corriente		Rango de tensión	Rango de velocidad de avance
		Clase	Diám.	Tipo y polaridad	Rango Amperaje		
1	SMAW	E6010	1/8"	C.C.- E.P	70-80	18-24	Normal
2	SMAW	E7018	1/8"	C.C.- E.P	110-130	18-24	Normal
3	SMAW	E7018	1/8"	C.C.- E.P	110-130	18-24	Normal
4	SMAW	E7018	1/8"	C.C.- E.P	110-130	18-24	Normal
Observaciones:		Precalentamiento:			Aceptación:		
Se realizaron cambios durante el procedimiento por propósitos investigativos, los cambios se indican en la etapa de elaboración de muestras.		-No se realizó al metal base. -Si se realizó para el electrodo E7018 WIS 18S, en horno de electrodos OVELMA			Diego Pabón Pabón Iván Darío Chinome Pérez		

#### 4.4 ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS

En esta etapa se realizaron las actividades de corte, biselado, montaje y ejecución de la soldadura en las muestras. Todas estas actividades fueron realizadas en las instalaciones del Centro Integral de Mantenimiento Industrial, SENA, contando con la colaboración de un técnico en soldadura y docentes de la institución. En las Figuras 4 y 5 se presentan detalles de estas actividades.

4.4.1 Corte y biselado. Se realizó el corte de las secciones del tubo con una sierra sin fin como se observa en la Figura 4.a. Las láminas de la muestra Tipo I fueron cortadas con plasma, como se indica en la Figura 4.b. En las muestras Tipo II, el corte con plasma de la lámina se realizó después del proceso de rolado, realizado en una empresa metalmecánica de la ciudad. El biselado de las muestras se realizó con disco abrasivo. En la muestra Tipo II se diseñó el trazado y desarrollo para la sección de tubo, sobre una plantilla de cartulina que sirvió de guía para marcar la forma del “boca de pescado”, y finalmente se desbastó dando un bisel para ambos tipos de muestras de 30°, ver Figura 4.c y 4.d.

4.4.2 Montaje. Se realizó situando el tubo sobre el centro de la lámina base, se dejó una separación de raíz de 1/8 de pulgada ubicando un electrodo del mismo diámetro (1/8”) entre los materiales, luego, verificando el nivel de la junta como se observa en la Figura 4.e, se soldaron cuatro puntos con electrodo E6010, Figura 4.f, para todas las muestras. Finalmente, se removió cualquier impureza o recubrimiento con disco de acero trenzado, verificando el estado óptimo para iniciar el proceso de soldadura, observar en la Figura 4.g.

Figura 4. Procedimiento de corte, biselado y montaje de las muestras



a. Corte tubería



b. Corte laminas



c. Biselado (boca de pescado) Tipo II



d. Biselado Tipo I



e. Montaje: Separación de Raíz



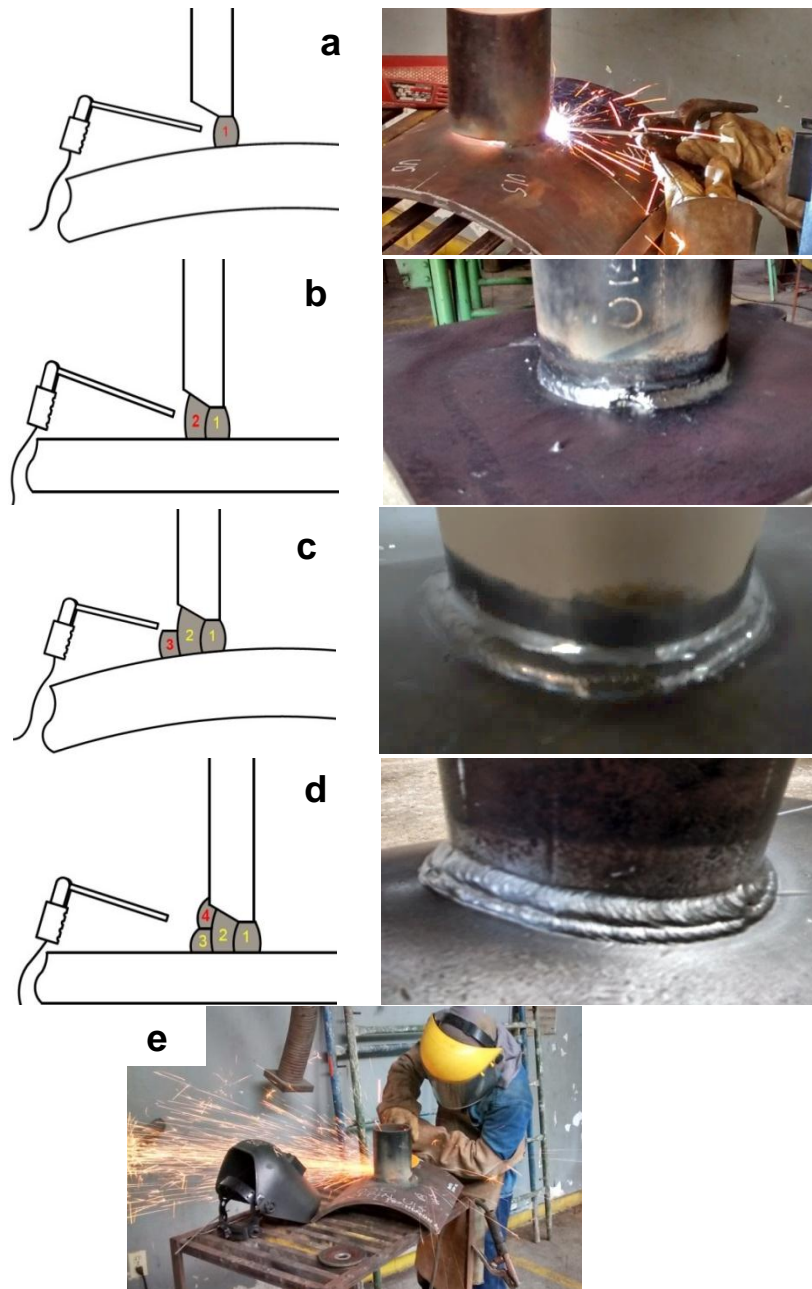
f. Montaje: puntos de soldadura



g. Estado inicial para soldadura

4.4.3 Ejecución de la soldadura. El proceso de soldadura se ejecutó con la realización de cuatro cordones, raíz, relleno, primero y segundo de presentación, como se evidencia en las Figuras 5 a, b, c y d, respectivamente. Entre cada cordón, se realizó la limpieza correspondiente con disco de acero trenzado y disco de pulidora de 1/8 de pulgada, ver Figura 5.e. Cuando se inició el pase de raíz, se fueron removiendo con un disco de 1/8" los puntos usados en el montaje.

Figura 5. Procedimiento de ejecución de soldadura en las muestras. a. Inicio cordón de Raíz. b. Cordón de Relleno. c. Primer cordón de Presentación. d. Segundo cordón de Presentación. e. Limpieza entre cordones.



En la Tabla 10, se presentan en orden de fabricación de las muestras, el procedimiento seguido para generar los defectos en la soldadura, previo conocimiento de los parámetros básicos de trabajo señalados en las Tablas 8 y 9.

En esta tabla, se muestran los factores que fueron alterados y el grado de variación aplicado para originar los defectos propuestos, en cada una de las muestras. Estos factores se determinaron, a partir de la revisión bibliográfica y ajustes realizados mediante pruebas preliminares, empleando una muestra para probar los resultados. En algunos casos fue necesario, experimentar varios métodos de generación de defectos, para luego definir los factores más adecuados o la combinación de estos, que resultaron en la mejor opción.

Es importante destacar que hubo defectos con mayor grado de dificultad, como fueron las grietas internas. Para ellas, fue necesario utilizar un electrodo Citodur 600, por la elevada dureza de su depósito, compuesto por Carburos de Cromo principalmente y una sensibilidad al agrietamiento moderada por su composición de 0.5% de Carbono. El procedimiento usado, fue generar una interface entre los dos metales de aporte E6010 y Citodur 600 en el pase de raíz. El depósito de E6010 se formó sobre la base curva de la muestras, y el depósito de Citodur 600 sobre el bisel del tubo (derivación), con una longitud de aproximadamente una pulgada. Además se golpeó cuatro veces con un martillo el tubo para desplazarlo en dos sentidos contrarios e inducir la grieta.



Tabla 10 (continuación). Factores alterados en el proceso de soldadura para obtención de los defectos.

No. Fabricación.	Tipo	Cordón	Defecto generado	Cambio de procedimiento								
				Amperaje	Oscilación irregular	Longitud de arco	Ángulo electrodo	Electrodo húmedo	Área sin limpieza	Remover revestimiento	Soldaduras disímiles	Esfuerzos inducidos
6	II	Raiz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Relleno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1° Present.	Porosidad	(-)12%	-	-	-	4 minutos	-	-	-	-
		1° Present.	Falta de Fusión	(-)28%	Si	-	-	-	-	-	-	-
		2° Present.	Socavación	-	-	(-)25%	(+)55°	-	-	-	-	-
7	I	Raiz	Falta de Fusión	-	Si	-	-	-	-	-	-	-
		Relleno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1° Present.	Porosidad Agrupada	(-)20%	-	-	-	4 minutos	-	Si	-	-
		2° Present.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	II	Raiz	Grieta	(+)46%	-	-	-	-	-	-	Citodur600	Si
		Raiz	Inclusión de Escoria	-	-	-	-	-	1 pulg.	-	-	-
		Relleno	Porosidad	(-)8%	-	-	-	4 minutos	-	Si	-	-
		1° Present.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2° Present.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(-) Indica disminución del factor descrito con el fin de generar el defecto señalado.

(+) Indica aumento del factor descrito con el fin de generar el defecto señalado.

#### 4.5 CARACTERIZACION NO DESTRUCTIVA DE LAS MUESTRAS

En esta etapa se llevó a cabo la caracterización de la defectología inducida mediante la aplicación de Ensayos No Destructivos (END), para lo cual, se realizó la inspección a las muestras para hallar los defectos inducidos y otros defectos que se hayan generado de manera no intencional. Por esto, se aplicó ensayos que permitan encontrar defectos superficiales, sub superficiales e internos, en todas las muestras. Los ensayos escogidos fueron Inspección Visual (I.V.), Líquidos penetrantes (L.P.), y Ultrasonido Industrial (U.I.).

4.5.1 Evaluación de las muestras aplicando criterios de aceptación y rechazo. En la Tabla 11, se presenta las normas técnicas utilizadas para la aplicación de cada ensayo y las normas de evaluación de las muestras de acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo.

Tabla 11. Normas técnicas aplicadas para el desarrollo y evaluación de los END.

<b>Técnica no destructiva</b>	<b>Norma de aplicación de ensayo</b>	<b>Norma criterios de aceptación y rechazo</b>
<b>I.V.</b>	ASME 2010, sección V, artículo 9.	ASME 2013, Sección VIII división 2, párrafo 7.5.2
<b>L.P.</b>	ASME 2010, sección V, artículo 6.	ASME 2013, Sección VIII división 2, párrafo 7.5.7
<b>U.I.</b>	ASME 2010, sección V, artículo 4.	ASME 2013, Sección VIII división 2, párrafo 7.5.4

En la Tabla 12, se presentan END aplicables a cada muestra de acuerdo con la defectología seleccionada para cada una de ellas. Sin embargo, se aplicaron todos los ensayos relacionados en la investigación para la caracterización de la totalidad de defectos generados en el proceso de soldadura, es decir defectos propuestos y no intencionales.

Tabla 12. Ensayos aplicados a cada muestra.

No. Muestra	Defectos Inducidos	Ensayos Aplicados	No. Muestra	Defectos Inducidos	Ensayos Aplicados
1	Sin defectos	Referencia	5	Inclusión de escoria	UI
2	Falta de penetración	IV, LP, UI		Porosidad (I)	
	Falta de fusión (I)		6	Porosidad (S)	IV, LP
	Falta de fusión (S)			Falta de fusión (S)	
3	Falta de penetración	IV, LP, UI	7	Socavación	IV, LP, UI
	Falta de fusión (S)			Falta de fusión (I)	
	Falta de fusión (S)		Porosidad (S)		
4	Socavación	IV, LP	8	Porosidad (I)	UI
	Falta de fusión (S)			Grieta (I)	
I: Interno. S: Superficial					

4.5.2 Comparación con los procedimientos diseñados. A partir de los resultados se hizo una comparación con lo planeado inicialmente en la fabricación de las muestras, y se analizó la efectividad de los métodos utilizados en la generación de defectos.

#### 4.6 ANALISIS DE RESULTADOS

Esta etapa reúne los resultados y análisis obtenidos de las pruebas y ensayos establecidos, y a partir de estos, se formulan las respectivas conclusiones. La información obtenida se presenta en el siguiente capítulo.

#### 4.7 ELABORACION DEL INFORME FINAL

Los datos e información recolectada se clasificaron y procesaron para la elaboración del informe del proyecto el cual será entregado y sustentado.

## 5. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de las etapas descritas en la metodología, y su respectivo análisis. Los resultados se presentan en tres secciones, Las pruebas y análisis al material base, la elaboración de las muestras, y los resultados de los END realizados a las muestras.

### 5.1 RESULTADO DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA, MECÁNICA Y METALOGRAFICA

A continuación se presentan los resultados de la caracterización de los metales base, realizada a fin de verificar la aptitud de los mismos para el uso dado en el proyecto. Se compararon los resultados con la información recibida del proveedor.

5.1.1 Resultados de la caracterización física. En la Tabla 13 se presentan resultados obtenidos de la caracterización física con un ensayo de inspección visual a los materiales empleados en la investigación. De la observación de la Tabla 13 se puede concluir que los materiales recibidos, láminas y tubo, no presentan daños en su superficie, que impidan la aplicación de soldadura.

5.1.2 Resultados de la caracterización química. En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos por el método de Espectrometría de Emisión Óptica (Ensayo de chispa), y los valores de composición indicados por la respectiva norma ASTM, para su comparación.

Tabla 13. Resultados de la caracterización física.

Material	Dimensiones	Evaluación
Lámina (muestra Tipo I)	600x800 mm Espesor: 9.5 mm	Superficie lisa, sin pandeo, bordes angulares. Sin rayas, golpes, o mordeduras. Presenta una capa de corrosión de fácil remoción
Lámina (muestra Tipo II)	Diámetro interior: 500 mm. Espesor:12.6 mm Longitud: 400 mm	Cilindro obtenido por rolado, con tres puntos de soldadura en el cierre de su forma. Superficie lisa, sin evidencia de golpes, marcas, rayas. Presenta una capa de corrosión de fácil remoción
Tubo (muestra Tipo I y II)	Diámetro:100 mm Espesor: 6.3 mm Longitud:130 mm	Superficie lisa, sin rayas, ni golpes. Presenta pintura de recubrimiento interno y externo

Tabla 14. Resultado análisis elemental por Ensayo Chispa y composición química.

	Material base	%C	%Mn	%P	%S	%Si
<b>ENSAYO DE CHISPA</b>	Lamina (muestra Tipo I) - A36	0.205	1.155*	0.008	<0.150	0.341
	Lamina (muestra Tipo II) - A283	0.141	0.718	0.0062	<0.150	0.194
	Tubo - A106	0.229	0.4	0.013	<0.150	0.21
<b>ASTM</b>	ASTM A36	0.25 Max	0.8	0.4	0.5	0.4 Max
	ASTM A283 Grado A	0.14 Max	0.9 Max	0.035	0.04	0.4
	ASTM A106 Grado A	0.25 Max	0.27-0.93	0.035 Max	0.035 Max	0.1 Min

\* El %Mn puede ser mayor (hasta 1.35%), en un 0.06% por cada disminución del 0.01% del Carbono máximo especificado.

A partir de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta la composición establecida en las especificaciones ASTM A36/A36M-97, ASTM A283/A283M-03 y ASTM A106/A106M-04, los materiales cumplen con las correspondientes porcentajes de aleantes y cuentan con las características químicas que favorecen la soldabilidad, como son, bajo porcentaje de carbono y elementos de aleación, de acuerdo a lo indicado en la literatura [15].

5.1.3 Resultados de la caracterización Mecánica. En la Tabla 15 se presentan los resultados de los valores de dureza, cada valor corresponde al promedio de tres mediciones de Dureza Rockwell A (HRA) tomadas a cada material, siguiendo la norma ASTM E18-03. Luego, por medio de las tablas de conversión de dureza para metales, encontradas en ASTM E140-02 se realizó la conversión a Dureza Brinell estándar para cada muestra.

Tabla 15. Dureza y resistencia a la tracción del metal base.

<b>Metal Base</b>	<b>PROMEDIO Durezas [HRA]</b>	<b>CONVERSION Dureza Brinell [HB]</b>	<b>Resistencia a la Tracción Calculada [MPa]</b>	<b>Resistencia a la Tracción ASTM [MPa]</b>
Lamina (muestra Tipo I)	49.67	150	517.5	400 - 500
Lamina (muestra Tipo II)	38.67	104	358.8	310 - 415
Tubo (muestra Tipo I y II)	49	147	507.1	415 Min

A partir de los resultados de dureza, se obtuvo el valor de resistencia a la tracción según la siguiente expresión:

$$TS \text{ (MPa)} = (3.45) \text{ HB}$$

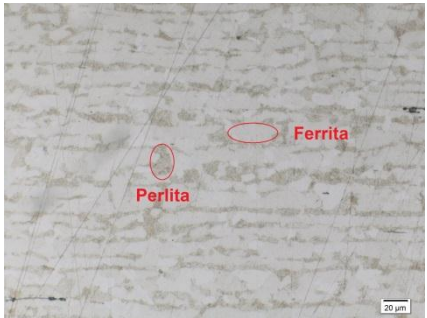
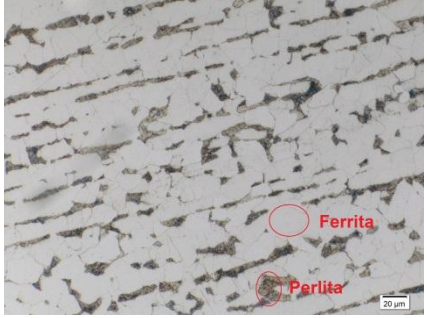
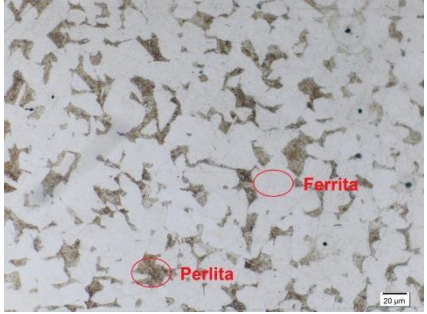
TS = Resistencia a la tracción[16].

HB = Dureza Brinell.

De los resultados obtenidos se puede decir, que las muestras presentan unas aptitudes mecánicas, deducidas de la resistencia a la tracción calculada, similares a los rangos indicados en las especificaciones ASTM correspondientes a cada acero. Con lo cual se comprobó la calidad y tipo de material recibido.

5.1.4 Resultado de caracterización Metalográfica. En la Tabla 16 se presenta los resultados del ensayo metalográfico el cual se realizó siguiendo las especificaciones de preparación de muestras y microataque dadas en ASTM E3-11 y ASTM E407-07.

Tabla 16. Análisis de microestructura de los materiales base

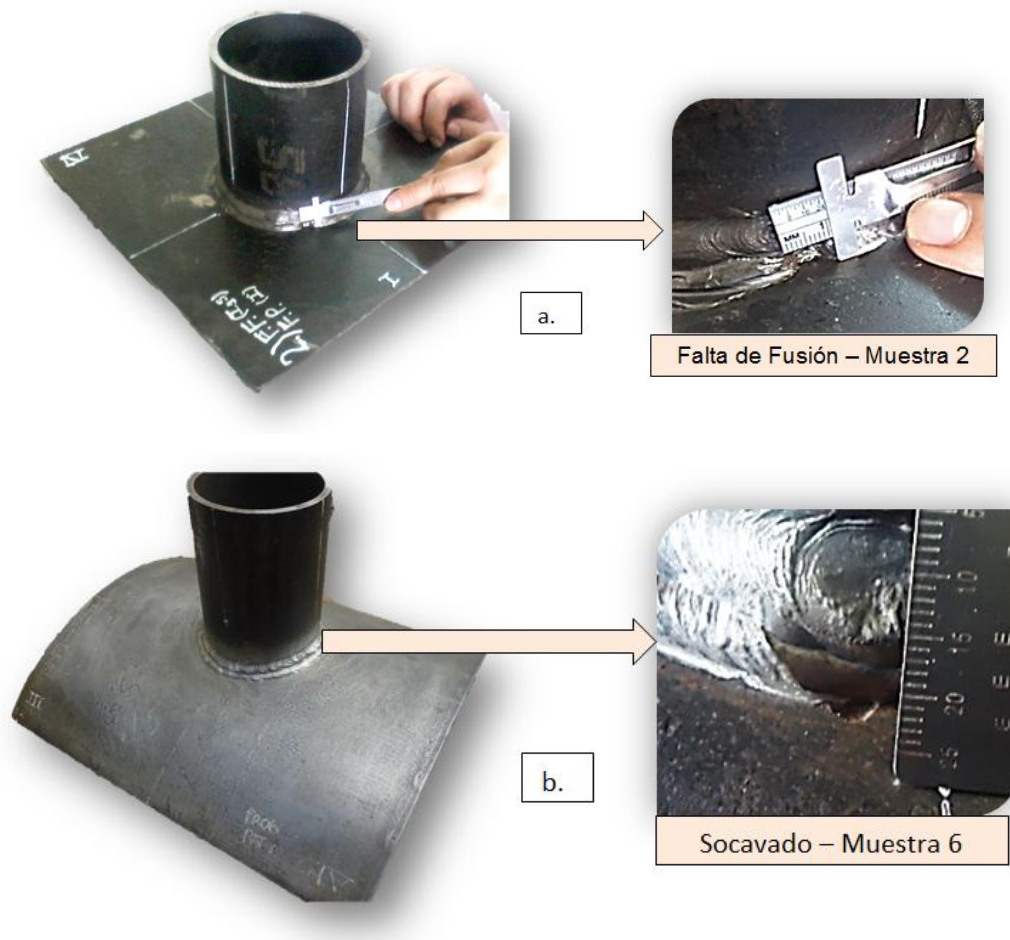
Metal Base	Microestructura - 500X	Análisis de la Metalográfico	
Lamina (muestra Tipo I)		<p>Los tres metales presentaron una estructura típica del acero hipoeutectoide y menores a 0.4%C, y se observó:</p>	<p>Se observa una estructura en bandas característica del trabajado en caliente, tamaño de grano menor que el grano de la lámina Tipo II debido a su menor espesor.</p>
Lamina (muestra Tipo II)		<p>Áreas claras: Granos Ferrita Áreas oscuras: Granos Perlita</p>	<p>Se observa un grano direccionado por un proceso de trabajado en caliente.</p>
Tubo (muestra Tipo I y II)		<p>Donde predomina la ferrita por tener una composición de carbono muy baja.</p>	<p>Se observa una estructura de equilibrio con tratamiento térmico de normalizado.</p>

De los resultados obtenidos se demuestra que la microestructura de los materiales corresponde a la de un acero de bajo carbono (0.141-0.229%C) esperada para el tipo de metal estudiado y suministrado por el proveedor.

## 5.2 RESULTADOS DE ELABORACION DE LAS MUESTRAS

Con los procedimientos indicados en la metodología se obtuvieron las cuatro muestras Tipo I y cuatro muestras Tipo II que se ilustran en la figura 6a y 6b respectivamente como resultado de la fabricación, a las cuales se les realizó la caracterización de su defectología asociada.

Figura 6. Ejemplos de muestras Tipo I y II fabricadas. a. Tipo I. b. Tipo II.



### 5.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LAS MUESTRAS

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la IV, LP y UI, aplicados a las muestras del proyecto. Con el propósito de explicar el análisis realizado en los tres ensayos a las muestras, se tomó la muestra 7 como ejemplo por ser representativa de los defectos inducidos interna y externamente.

Los análisis de resultados se hicieron aplicando los criterios de aceptación y rechazo indicados en el Anexo B, y la evaluación para todas y cada una de las muestras se presenta en el Anexo C.

5.3.1 Resultados del ensayo de Inspección Visual. El procedimiento de Inspección Visual se desarrolló de acuerdo al código ASME Sección V artículo 9, teniendo en cuenta los parámetros señalados en el Anexo A, usando como instrumentación un Kit de Inspección Visual y se realizó en un ambiente con iluminación de 712 lx, en el cual es posible visualizar detalles finos.

En la Tabla 17 se presentan los resultados de la muestra 7 en I.V, tanto antes como después de la limpieza.

A partir de esta tabla, se evidencia mayor precisión en la medición de las discontinuidades al inspeccionar después de hacer limpieza con detergentes, pudiendo encontrar una nueva discontinuidad, la indicación 9, además se aprecian cinco porosidades seleccionadas en el diseño de las muestras, lo cual se obtuvo con la alteración de factores de soldadura, y se hallaron otras indicaciones como salpicaduras generadas en el proceso de manera inesperada.

Tabla 17. Indicaciones obtenidas por Inspección Visual en muestra 7.

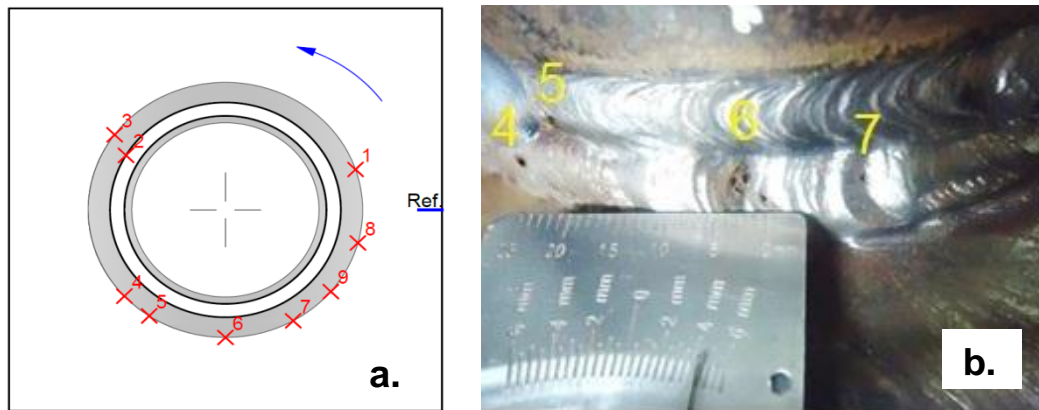
D.S*	Indicación	Indicaciones encontradas	Dimensiones (mm)		Aceptación ASME VII
			Pre - limpieza	Post - Limpieza	
	1	Cordón Irregular	40	40	N.A.
	2	Porosidad ZAT	2	2.2	Rechaza
	3	Salpicadura	3	2.9	Rechaza
▶	4	Porosidad	2<	2	Rechaza
▶	5	Porosidad	1<	1	Rechaza
▶	6	Porosidad Agrupada	*DG=4,7 , DI≈0,8	DG=4,7; DI≈0,8	Rechaza
▶	7	Porosidad	1	1.1	Rechaza
	8	Salpicadura	2x3	2x2.5	Rechaza
▶	9	Porosidad Agrupada (Hallado después limpieza)	-	DG=4	Rechaza
Altura promedio de cordón, medida con galga tipo CAM: 12.75 mm,					

\* D.S: Defectos seleccionados, inducidos intencionalmente.

\* D.G: Diámetro Grupo; DI: Diámetro Individual, N.A.: No Aplica.

En las Figuras 7a y 7b, se presenta un plano donde se ubican las indicaciones en la muestra y una imagen de las indicaciones 4, 5, 6 y 7, las cuales corresponden a defectos que se había propuesto generar. Estos defectos presentan un distanciamiento entre ellos, causados por la diferente combinación de los factores en cada tramo dependiendo del avance de la soldadura, tales como la disminución del amperaje en un 20% en dichos puntos, la humedad agregada al electrodo y la ausencia de revestimiento. Se pudo evidenciar que la porosidad agrupada se generó donde se combinaron los tres factores, a diferencia de la porosidad individual pues ésta se generó solo por combinación de electrodo húmedo y disminución de amperaje.

Figura 7. Indicaciones Halladas por IV en la muestra 7. a.) Plano, b.) Ubicación de las porosidades.



Aunque el propósito fue generar defectos de dimensiones próximas a los criterios de aceptación y rechazo, es decir, por encima y por debajo del nivel de aceptación, esto no se logró debido a la dificultad de controlar el proceso manual de soldadura aplicado, y se obtuvo discontinuidades de tamaño rechazable.

5.3.2 Resultados del ensayo de Líquidos Penetrantes. El procedimiento de Inspección por líquidos penetrantes se desarrolló teniendo en cuenta los parámetros señalados en la Anexo A. En la Tabla 18 se presenta los resultados para la muestra 7, obtenidos en esta inspección.

A partir de esta tabla se puede apreciar que se identificaron catorce discontinuidades redondeadas como porosidades, salpicaduras y faltas de fusión, donde las indicaciones encontradas en su mayoría son aceptables con los criterios de aceptación y rechazo aplicados.

Tabla 18. Indicaciones obtenidas por Líquidos Penetrantes para muestra 7.

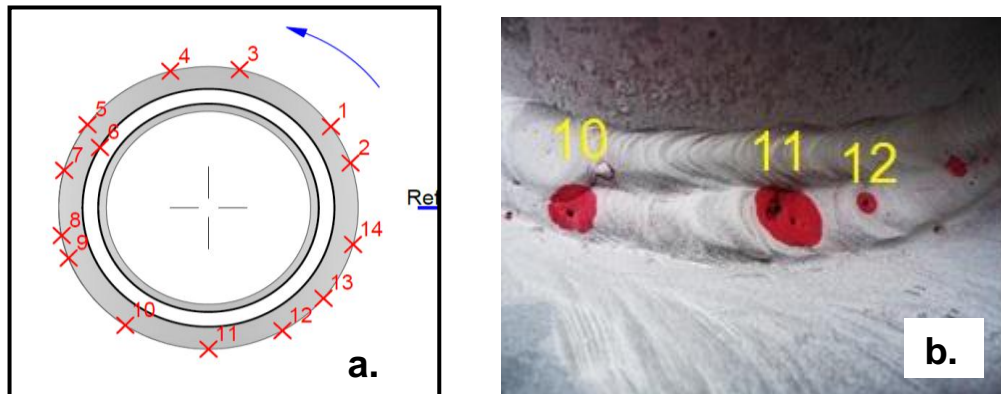
Indicación	Tamaño mm	Tipo Indicación	Aceptación ASME VIII	Origen aparente
1	6.35x6.35	Red.*	Rechaza	Falta Fusión
2	3.5x3.5	Red.	Acepta	Salpicadura
3	3.5x3.5	Red.	Acepta	Porosidad ZAT
4	4x4	Red.	Acepta	Salpicadura
5	5x4	Red.	Acepta	Falta Fusión Cordones
6	6x6	Red.	Acepta	Salpicadura
7	2x2	Red.	Acepta	Porosidad
8	3x3	Red.	Acepta	Salpicadura
9	4.7x4.5	Red.	Acepta	Salpicadura ZAT
10	10x10	Red.	Rechaza	Porosidad
11	12x7	Red.	Rechaza	Porosidad Agrupada
12	4x4	Red.	Acepta	Porosidad
13	5x5	Red.	Acepta	Porosidad Agrupada
14	3x3	Red.	Acepta	Salpicadura

\* Red: Indicación Redondeada

En las Figuras 8a y 8b, se muestra un plano donde se ubican las indicaciones encontradas y una imagen de una región donde se presentan las indicaciones 10, 11 y 12, las cuales en LP se observó mejor su distribución en el cordón (porosidades individuales y agrupadas, generadas intencionalmente), que presentan un volumen considerable y por lo tanto un tamaño de indicación (sangrado) que la hace inaceptable. Este ensayo permitió una mejor estimación de la criticidad del defecto.

La inspección con LP complementó el ensayo de IV, pues se verificaron las indicaciones encontradas anteriormente y permitió encontrar nuevas indicaciones como faltas de fusión.

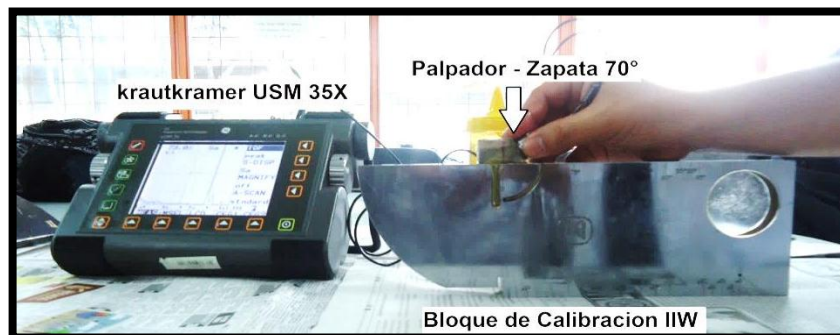
Figura 8. Indicaciones Halladas por LP en la muestra 7.



5.3.3 Resultados del ensayo de Ultrasonido. El procedimiento para la inspección por ultrasonido industrial se llevó a cabo teniendo en cuenta los parámetros señalados en el Anexo A y cálculos operativos de la Tabla 19, usando los equipos que se muestran en la Figura 9.

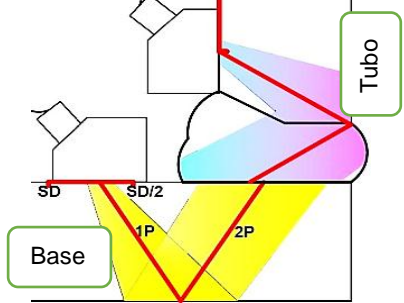
Para la calibración del equipo se utilizó el bloque IIW-V2 (Figura 9), y se siguió el código ASME sección V artículo 9 para la elaboración de la curva DAC. Para esta última fue necesario elaborar el respectivo patrón sobre la muestra 1, perforando los barrenos indicados en la norma.

Figura 9. Equipos usados en la inspección por ultrasonido, Krautkramer USM 35X y bloque IIW



Se realizó la inspección por ultrasonido sobre la base y el tubo derivación para aumentar la precisión y evaluar la soldadura adecuadamente, teniendo en cuenta que la amplitud de las indicaciones fuera mayor al 20% en pantalla y usando la curva DAC como referencia de la altura de los ecos en pantalla, y luego se determinó la longitud con el método de Caída de los Seis Decibeles.

Tabla 19. Cálculos operativos para inspección con zapata 70°

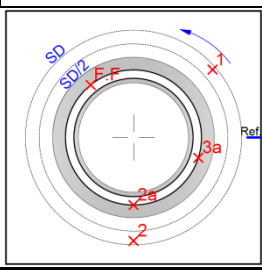
Zona de Cálculo	Recorrido de Primera Pierna $1P = t/\cos \theta$	Paso $SD = t \tan \theta$	Medio Paso $SD/2 = t \tan \theta$	
Base Tipo I	1.286"	1.227"	2.453"	
Base Tipo II	1.7101"	1.635"	3.271"	
Tubo Derivación	0.855"	0.818"	1.635"	

Se obtuvo los datos de indicaciones para la muestra 7, presentados en Tabla 20, en ella se observan los datos de las indicaciones para zapata de 70°, donde fue posible la mejor caracterización ultrasónica. En la tabla, de izquierda a derecha se presenta, la columna llamada "Indicación" que relaciona la identificación dada a cada una, luego la profundidad (Da) desde la superficie hasta la ubicación interna de la discontinuidad, la distancia recorrida del haz ultrasónico (Sa), la distancia superficial (Pa) a la cual se encuentra, la longitud estimada y el resultado de la aplicación del criterio de aceptación indicado en el Anexo B.

Analizando la indicación "1a", que corresponde a la falta de fusión propuesta, su forma fue comprobada por medio de barrido con oscilación circular del palpador, donde el eco apareció y desapareció con rapidez, además la señal se presentó aguda y estrecha como se observa en la Figura 10a, lo cual se espera para una indicación lineal. Como se observa en la Tabla 20, la indicación "1a" tiene una distancia superficial considerablemente menor comparada con las demás, debido

a que se halló en el límite del campo de inspección cercano indicado en la Tabla 19 para base tipo I. Con lo anterior se pudo obtener las características de la falta de fusión que se propuso inducir, para la cual se logró una longitud de 10 mm (0.393") y de esta manera es rechazable bajo el criterio tratado.

Tabla 20. Indicaciones obtenidas en inspección por ultrasonido para la muestra 7.

Muestra Número 7	Indicación	Profundidad Da"	Recorrido del haz Sa"	Distancia Superficial Pa"	Longitud Indicación	Aceptación ASME VIII-2
	1	0,181*	2,797	2,674	0.512	Rechaza
	2(PI)	0,190	2,768	2,647	0.220	Acepta
	1a* (FF)	0,190	1,056	1,009	0.393	Rechaza
	2a*	0,078	1,977	1,891	0.354	Rechaza
	3a(PI)	0,175	2,308	2,207	0.275	Rechaza
	Zapata 60°	1	0.128	1860	1535	0.315

\*La letra "a" se refiere a indicaciones halladas en el tubo derivación.

\*Los datos se presentan en pulgadas para mejor comprensión de la inspección.

\*FF: Falta Fusión, PI: Porosidad Interna.

Se encontró además de los defectos inducidos, otra indicación que se conoce como Eco Geométrico, el cual es una indicación irrelevante debida a la pared posterior del cordón de raíz o la cara opuesta en la base de la misma pieza, para lo cual se hizo un análisis detenido de los planos de diseño de la pieza y las posibles trayectorias del haz ultrasónico. Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la Tabla 20, además se tuvo en cuenta la altura del cordón y el espesor de pared hallados en la inspección visual y la distancia de ubicación del palpador fue 46 mm, se verificó el eco catalogado como geométrico, por medio de la siguiente operación:

Para la indicación 1:

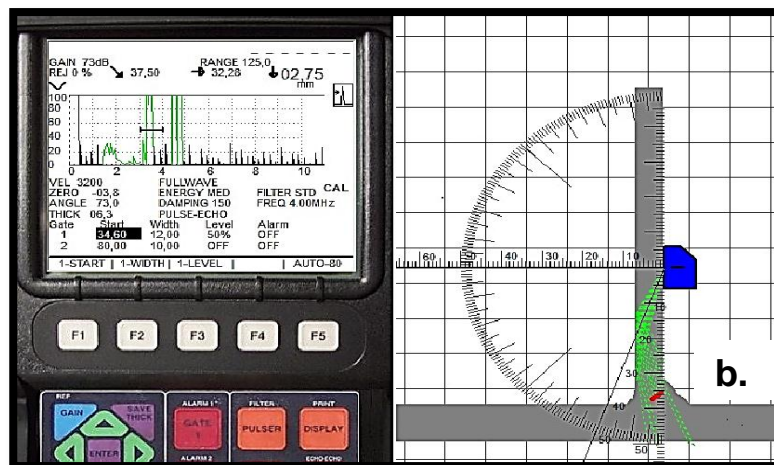
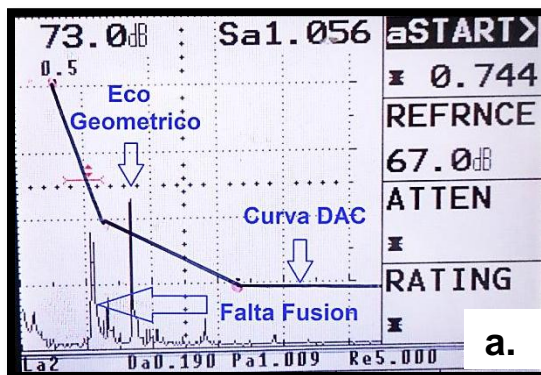
Distancia palpador indicación + altura cordón + espesor de pared = distancia superficial

$$46 + 13 + 6.35 = 67.91 \text{ mm}$$

$$\text{Distancia Superficial (Pa)} = 2,674'' \quad (67,92\text{mm})$$

Esto llevó a determinar que las indicaciones, como se ve en la Figura 10a, con características similares a la número 1, 2a y otras son de tipo geométrico.

Figura 10. Verificación de discontinuidad hallada en el tubo de derivación para muestra 7. a.) Discontinuidad hallada con el equipo USM35X; b.) Verificación por medio de simulador UTman de la falta de fusión inducida.



Como complemento en el análisis de las indicaciones halladas y debido a la limitación por los espesores mayores a 15mm para la inspección por Radiografía Industrial, se usó como alternativa el simulador ultrasónico UTman, el cual permite inspección con equipo ultrasónico Panametrics EPOCH 4B, como se observa en la Figura 10b, donde se usaron los mismos parámetros de inspección por Ultrasonido (Anexo A), se analizaron los ecos observados, la dispersión del haz ultrasónico con el equipo USM, como se observa en la Figura 10.

La indicación "1a" se presenta en la Figura 10b ubicada entre el bisel y el cordón, donde se pudo inferir que allí está el defecto, por su ubicación espacial, dada por la Distancia Superficial  $P_a$  y Profundidad  $D_a$ , además no hay dispersión del eco, como se observa en la comparación de las imágenes, luego esta señal corresponde a la falta de fusión siendo razonable el hecho de que esté a menor distancia que el eco geométrico que se describió y como consecuencia éste atenúa su amplitud.

- Inspección complementaria con Zapata de 60°. Se realizó una inspección con zapata de 60°, donde se puede resaltar que la zona de inspección es menor y más cercana a la soldadura, con la cual se encontraron las mismas indicaciones de eco geométrico. La inspección del tubo derivación no fue efectiva, debido a que los cálculos operativos mostraron que el campo cercano es pequeño y con esta zapata no habrá adecuada incidencia del haz y visualización de indicaciones, de igual manera, se probó la inspección con tercera y cuarta pierna sin resultados satisfactorios, además la curvatura del tubo dificultó el acople con la zapata.

#### 5.4 COMPARACIÓN DEL DISEÑO Y LOS RESULTADOS

A partir del diseño mostrado en la Tabla 7 y los resultados obtenidos en el Anexo C, se puede resaltar el cumplimiento de la defectología seleccionada en las muestras. Fue posible identificar y caracterizar con los END su presencia en las muestras, donde se consiguieron los defectos internos y superficiales propuestos y además se generaron defectos no intencionales, cuya aparición se debió a los factores de soldadura anormales bajo los que se trabajó, y al proceso de soldadura manual que implica una gran destreza y técnica del soldador.

## 6. CONCLUSIONES

- Se fabricaron con base en la metodología propuesta y los WPS elaborados, muestras soldadas con defectología inducida seleccionada, cuatro de base plana y cuatro de base curva (Ver Tabla 6). Adicionalmente se caracterizó su defectología empleando IV, LP y UI según el código ASME Sección VIII división 2.
- Se logró obtener los defectos propuestos con ayuda de información bibliográfica, experiencia del técnico soldador y ajuste experimental de los parámetros, para lo cual fue importante establecer unas condiciones iniciales como, forma, tipo de junta, defectos, y proceso de soldadura. Los factores que se modificaron generaron, además de los defectos propuestos, defectos no intencionales, que aun teniendo menor relevancia, dan cuenta de la dificultad para controlar el proceso de soldadura manual con electrodo revestido.
- Los Ensayos No Destructivos aplicados permitieron identificar y caracterizar los defectos inducidos. La Inspección Visual, mostró la presencia de los nuevos defectos después de limpieza en la muestra, los Líquidos Penetrantes complementaron la identificación superficial de las imperfecciones más pequeñas, y el Ultrasonido Industrial logró determinar la presencia y criticidad de las indicaciones internas, siendo este el ensayo de mayor exigencia al inspector para interpretar los resultados. Desafortunadamente, no se contó con otro ensayo de inspección interna ya que los espesores de las muestras superaban los parámetros de trabajo del equipo de Radiografía Industrial disponible en la escuela de Ingeniera Metalúrgica.
- Por medio de ultrasonido industrial, se pudo comprobar la existencia de defectos propuestos acordes a muestras diseñadas para enseñanza del

ensayo referido. Además de esto, se presentó en todas las muestras un factor de estudio complementario, como fue el eco geométrico que exige un análisis concienzudo en la lectura de ecos en pantalla del equipo de UT.

- En la evaluación de las muestras se emplearon los criterios de aceptación y rechazo indicados en el código ASME sección VIII, división 2, encontrándose discontinuidades con dimensiones dentro y fuera de dichos criterios, constituyéndose en muestras apropiadas para entrenamiento y capacitación en las técnicas estudiadas.
- La información disponible en la literatura en cuanto a generación de defectología no es replicable en todos los casos, pues está dada de manera muy general, sin embargo, se elaboraron las muestras propuestas, deduciendo durante su fabricación, que algunos factores de generación de defectos son más funcionales, como la variación de amperaje y longitud de arco.
- Los defectos inducidos en las muestras aportan a la enseñanza de END, debido a la distribución y variedad obtenidas en cada una, con lo cual, para cualquiera de los ensayos aplicados se obtendrá defectos a estudiar, ya sea internos o externos.
- La presencia de defectos críticos en la soldadura producen una disminución de las propiedades en servicio, por lo cual su adecuada detección es importante. Hay variedad de indicaciones que se pueden generar al cometer una falla durante el proceso de soldadura, estas no son detectables con una simple Inspección Visual, por lo que se hace necesario emplear ensayos complementarios que permitan la inspección total de la misma.

## 7. RECOMENDACIONES

- Se sugiere el cuidado de las muestras engrasándolas periódicamente y un adecuado almacenamiento para prolongar su vida útil, evitando daños por corrosión u otros factores adversos que puedan afectar la integridad de estas.
- Se sugiere continuar con la investigación fabricando otro tipo de muestras no convencionales, como juntas Tipo Y o Tipo K, profundizando en causas y generación de otra clase de defectos, y haciendo unas variantes al diseño de soldadura.
- Para el desarrollo de trabajos similares se debe contar con el apoyo de personas con conocimiento y capacitación en el manejo de los equipos de END, así como con técnicos experimentados en soldadura para poder lograr los objetivos propuestos.
- La investigación se puede extender a juntas no soldadas, sería significativo diseñar y desarrollar muestras para entrenamiento en END, usando componentes como bridas y válvulas de corte, montajes de la industria petroquímica, uniones por medio de pernos en estructuras como puentes, a los cuales se les puede inducir defectos propios de su funcionamiento.
- Se sugiere la valoración periódica del estado de los equipos del laboratorio de ensayos no destructivos como son, equipo para medición de Iluminación, calibrador digital, equipo USM 35X y accesorios como zapatas, transductores y sus cables coaxiales.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JEFFUS, Larry. Welding: Principles and Applications. 7 ed. USA. Delmar, Cengage Learning. Publicado en 2012. ISBN-13: 978-1-1110-3917-2.
- [2] RODRÍGUEZ, Pedro Claudio. Manual del Soldadura. En: Soldadura eléctrica MIG y TIG. Editorial Alsina. 1 ed. Bueno Aires, Argentina. Publicado en 2001.
- [3] GOMEZ, Orlando J. Soldadura de Metales. Bucaramanga, Colombia. Publicaciones UIS, 1a Ed., p. 93.
- [4] -----,-----, Bucaramanga, Colombia. Publicaciones UIS, 1a Ed p. 94.
- [5] RODRÍGUEZ GONZALES, Cristina. Sistema Automatizado de Detección de Defectos en Piezas Metálicas Mediante Ensayos No Destructivos con Ultrasonido. Universidad de Cantabria. Tesis de grado. Publicado en 2012.
- [6] ECHEVARRÍA, Ricardo. Defectología. Universidad Nacional de Comahue, publicado en 2002, p. 37.
- [7] GONZÁLEZ GUERRA, Belzyt. Manual de Introducción a los END. Grupo Sistend Testing C.A. s.l. Disponible en: <http://sistendca.com/documento.html>.
- [8] CURSO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (febrero, 2014: Bucaramanga, Colombia). Memorias. Universidad Industrial de Santander. MSC. Luz Amparo Quintero Ortiz.

- [9] KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología en Aseguramiento de Calidad, Prueba e inspección, México: editorial Pearson Education Inc., 5 ed., 2008, p. 1132.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry. West Conshohocken. ASTM International, 2012.
- [11] -----.----- . Editorial Pearson Education Inc., 5 ed., 2008, p. 1133.
- [12] -----.----- . Editorial Pearson Education Inc., 5 ed., 2008, p.1134.
- [13] ECHEVARRÍA, Ricardo. Defectología. Universidad Nacional de Comahue, publicado en 2002, p. 37
- [14] Sistema Automatizado de Detección de Defectos en Piezas Metálicas Mediante Ensayo No Destructivos con Ultrasonidos, Tabla 2.3, Universidad de Cantabria, Tesis de grado 2012.
- [15] -----.----- . Bucaramanga, Colombia. Publicaciones UIS, 1a Ed., p. 117.
- [16] METALS HANDBOOK: Properties and Selection: Irons and Steels, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes Editor, American Society for Metals, 1978, pp. 36 y 46
- [17] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessels Code section VIII division 2. Two Park Avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2013.
- [18] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessels Code section V. Two Park Avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2010.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessels Code section V y VIII division 2, Welding, Brazing, and Fusing Qualifications section IX. Two Park Avenue New York: ASME, 2009-2013.

GOMEZ MORENO, Orlando José. Soldadura de Metales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1993. p. 93.

JEFFUS, Larry. Welding: Principles and Applications. USA. Delmar, Cengage Learning. 2012.

KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología en Aseguramiento de la calidad, Prueba e inspección. Pearson Education Inc. 5 ed. p. 1132.

METALS HANDBOOK: Properties and Selection: Irons and Steels, American Society for Metals, 9th edition, B. Bardes Editor. 1978, Vol. 1. pp. 36 y 46.

RODRÍGUEZ GONZALES, Cristina. Sistema Automatizado de Detección de Defectos en Piezas Metálicas Mediante Ensayos No Destructivos con Ultrasonido. Santander: Universidad de Cantabria. 2012.

## ANEXOS

### Anexo A. PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN PARA END.

- Parámetros para el ensayo de inspección visual [17].

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER ESCUELA DE INGENIERÍA METALURGICA PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE INSPECCIÓN VISUAL PROYECTO DE MUESTRAS CON DEFECTOS	07/11/2014
	PND - IV 01
	REVISIÓN 1
	HOJA 1 DE 1
<b>CONDICIONES DE TRABAJO</b>	
Propósito del ensayo: Encontrar e identificar discontinuidades superficiales	
Criterios de la norma: ASME Sección VIII, División 2	
Fecha de realización del último ensayo: 15/11/ 2014	
Iluminación: 712 [lx] Escala B	Fecha entrega: 01/11/2014
Normas Usadas: ASME secc. V art. 9	Área a evaluar: Soldadura y ZAT
Método: Inspección visual directa con uso de instrumentación auxiliar (Kit IV).	
<b>INFORMACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA</b>	
Componente: Unión con soldadura de tuberías en T	Material: Acero al carbono
Proveedor: Compañía General Aceros, Ferretería Reina	Especificación: ASTM A36 y ASTM A106, ASTM A283
DIMENSIONES:	Espesor Niple: 6.35 mm
Muestra Tipo I: 298x298 mm	Espesor Base Plana: 9, 45 mm
Muestra Tipo II: 357X400 mm	Espesor Base Curva: 12 mm

- Parámetros para el ensayo de Líquidos Penetrantes [17].

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER ESCUELA DE INGENIERÍA METALURGICA PROCEDIMIENTO DE LIQUIDOS PENETRANTES PROYECTO DE MUESTRAS CON DEFECTOS	07/11/2014
	PND - LP 01
	REVISIÓN 1
	HOJA 1 DE 1
Código Aceptación: ASME Secc. VIII División 2	Método: Tipo II método C
Componente: Unión con soldadura de tuberías en T	Temperatura: 24°C
Limpieza previa: grata manual, papel abrasivo #120 y detergente en polvo.	
Limpiador: Spotcheck - SK5 Spray	Tiempo Secado: 10 min.
Penetrante: Spotcheck SKL - SP 2 Spray	Tiempo Acción: 12 min.
Aplicación penetrante por: Spray	Remoción: Papel, tela limpiador
Revelador: Spotcheck SKD - S2	Tiempo revelado: Inmediato
<b>CONDICIONES DE TRABAJO</b>	
Propósito del ensayo: Encontrar e identificar discontinuidades abiertas a la superficie	
Fecha de realización del último ensayo: 22/11/ 2013	
Iluminación: 712 [lx] Escala B	Fecha entrega: 01/11/2014
Norma procedimiento: ASME secc. V art. 6	Área a evaluar: Soldadura y ZAT

- Parámetros para el ensayo de Ultrasonido [17].

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER ESCUELA DE INGENIERÍA METALURGICA PROCEDIMIENTO PARA ULTRASONIDO INDUSTRIAL PROYECTO DE MUESTRAS CON DEFECTOS		07/11/2014
		PND - UT 01
		REVISIÓN 1
		HOJA 1 DE 1
Código Aceptación: ASME Secc. VIII, División 2		Procedimiento: Scan A
Componente: Unión con soldadura de tuberías en T		Temperatura: 22°C
Limpieza previa: grata manual, papel abrasivo #120 y detergente en polvo.		
Tipo de material: Acero ASTM A36, A106, A283.		Tipo de Junta: Filete
Agente de Acople: Aceite monógrado		Bloque Calibración: IIW Tipo 2
Equipo de Inspección: USM 35X		Frecuencia palpador: 5 MHz
Método: Emisión - Reflexión		Diámetro del palpador: 10 mm
<b>CONDICIONES DE TRABAJO</b>		
Propósito del ensayo: Encontrar e identificar indicaciones usando curva DAC		
Fecha de realización del último ensayo: 22/11/ 2013		
Ángulos de Zapata: 60 y 70°		Fecha entrega: 01/11/2014
Norma procedimiento: ASME secc. V art. 4		Área a evaluar: Soldadura y ZAT
Ganancia de Sensibilidad: 67 dB	Ganancia de Trabajo: 73 dB	Numero de Juntas: 8

**Anexo B.** Criterios usados para evaluación por END, según ASME sección VIII división 2 [18].

- Criterios evaluación para Inspección Visual (ASME 2013 Sección VIII división 2, parágrafo 7.5.2).

<b>Indicación</b>	<b>Criterio de evaluación</b>
Socavación	La reducción menor a 0,8 mm (1/32 pulgadas.) ó 10% del espesor nominal menor (derivación: 0,6 mm; base: 0.8 mm)
Grietas	No permitidas
Porosidad	No permitida
Cavidad de contracción	No permitida
Inclusión de escoria	No permitida
Inclusiones	No permitidas
Fusión incompleta	No permitida
Falta de penetración	No permitida
Quemones	No permitida, remover por esmerilado
Salpicadura	Si no se minimiza no se acepta, remoción por esmerilado.
Marcas de maquinado	No permitida
Concavidad	Son aceptables si el espesor de soldadura menor o igual al espesor del menor de los materiales.

- Criterios usados para Líquidos Penetrantes (ASME sección VIII-2 parágrafo 7.5.7.)

Una indicación puede ser más grande que la imperfección que la causa, sin embargo el tamaño de la indicación es la base para la aceptación. Solo la indicación con dimensiones mayores 1.5 mm (1/16") son consideradas relevantes:

(1) Una indicación lineal es la que tiene la longitud mayor a tres veces su ancho.

(2) Una indicación redondeada, puede ser circular o elíptica en la cual su longitud es igual o menor a tres veces su ancho.

(3) Cualquier indicación dudosa debe ser reexaminada para determinar si es relevante.

Las indicaciones inaceptables deben ser removidas o reducidas a tamaño aceptable. Todas las superficies examinadas deben estar libre de:

(a) Indicaciones lineales relevantes.

(b) Indicaciones relevantes redondeadas mayores a 5 mm (3/16").

(c) Cuatro o más indicaciones relevantes redondeadas en una línea separadas por 1.5 mm (1/16") o menos, borde a borde.

Indicaciones detectadas como grietas, independiente de las condiciones de la superficie, son inaceptables.

- Criterios usados para Ultrasonido (ASME sección VIII-2 parágrafo 7.5.4.).

Todas las indicaciones que producen una amplitud mayor al 20% en pantalla, deberán ser investigadas por el operador para determinar la forma, identidad y localización, y se someten a los siguientes criterios de aceptación:

(a) Grietas, faltas de fusión y penetración incompleta son inaceptables independientemente de su longitud.

(b) Todas las demás indicaciones de tipo linear son inaceptables si la amplitud excede el nivel de referencia y la longitud de la imperfección excede lo siguiente:

(b.1.) 6 mm (1/4") para espesor menor a 19 mm (3/4").

(b.2.) 1/3 del espesor, para espesores mayor o igual a 19 mm (3/4") y menor que 57 mm (2-1/4").

(b.3.) 19 mm (3/4") para espesores mayores a 57 mm (2-1/4").

Con dos miembros tiene diferente espesor para la soldadura, el espesor a tomar será el menor de los dos en juntas a tope. En juntas en filete con penetración completa el espesor a través del filete debe ser incluido en el espesor tomado.

**Anexo C.** Resultados de las inspecciones por END realizadas a todas las muestras.

▪ Resultados de Inspección Visual

Muestra	Defecto	Tamaño	Aceptación ASME VIII	Muestra	Defecto	Tamaño	Aceptación ASME VIII
1	Falta entre cordones	12.7x3	Rechaza	5	Corrosión ZAT y cordón	14	No aplica
	Salpicadura	25.4	Rechaza		Cordón Irregular	12	No aplica
	Cordón irregular	36.5	No aplica		Socavado (Derivación)	11.5	Rechaza
	Salpicadura	1.12	Rechaza		Cordón Irregular	15.8	No aplica
	Cordón irregular	24.6	No aplica		Falta de fusión	3x1	Rechaza
	Salpicadura	1.74	Rechaza		Socavado (Derivación)	4x10	ACEPTA
	Salpicadura	1.64	Rechaza		Salpicadura	1x1	Rechaza
	Porosidad Agrupada	3.97x3.18	Rechaza		Cordón Irregular	5x1	No aplica
	Porosidad Individual	D < 1	Rechaza		Salpicadura	10x6	Rechaza
	Salpicadura	11.3	Rechaza		Salpicadura	12x6	Rechaza
	Porosidad Agrupada	3.2x2	Rechaza		Socavado (Derivación)	4x1	ACEPTA
Socavado (Derivación)	7.5x0.9	Rechaza	Cordón Irregular	9	No aplica		
2	Falta fusión	10.3x3.96	Rechaza	6	Falta de fusión	15x2.5	Rechaza
	Salpicadura	3.8	Rechaza		Salpicadura	1	Rechaza
	Cordón irregular	12.1	No aplica		Cordón Irregular	8.5	No aplica
	Falta penetración	25xProf:2	Rechaza		Porosidad Agrupada	3x3	Rechaza
	Cordón irregular	0.5	No aplica		Porosidad	Diam.: 1	Rechaza
	Socavado (Derivación)	6x1	Rechaza		Cordón Irregular	7.7	No aplica
	Falta de fusión(entre)	15x1	Rechaza		Salpicadura	6	Rechaza
	Porosidad Agrupada	5x2	Rechaza		Salpicadura	2	Rechaza
	Marcas de maquinado	7x3	Rechaza		Socavado	25x5	Rechaza

Muestra	Defecto	Tamaño	Aceptación ASME VIII	Muestra	Defecto	Tamaño	Aceptación ASME VIII
2	Falta de fusión(entre)	12x1	Rechaza	6	Corrosión (cordón)	40	No aplica
3	Socavado (Base)	4.5x2.6	Rechaza		Salpicadura	2	Rechaza
	Salpicadura	3.17	Rechaza		Porosidad Agrupada	3x3	Rechaza
	Falta de penetración	12xProf:1	Rechaza		Salpicadura	1.5	Rechaza
	Exceso de penetración	20x3	No aplica		Falta de fusión (entre)	5	Rechaza
	Falta de fusión(entre)	6x2	No aplica		Falta de fusión (entre)	1	Rechaza
	Socavado	6x7	Rechaza		Concavidad (externa)	5x3	ACEPTA
	Cordón irregular (empalme)	7x8	No aplica		8	Falta de fusión (entre)	11x1
4	Falta Fusión (base)	11.9	Rechaza	Cordón Irregular		32	No aplica
	Socavado	6.35x3	Rechaza	Falta de fusión (base)		3	Rechaza
	Salpicadura	3.9	Rechaza	Cordón irregular (empalme)		10	No aplica
	Socavado	9.53x1.1	Rechaza	Falta de fusión (base)		19.6x0.5	Rechaza
	Salpicadura	1.98	Rechaza	Falta de fusión (base)		15.8x0.5	Rechaza
	Cordón irregular	6.35	No aplica	Falta de fusión (base)		9x0.5	Rechaza
	Pandeo	3	No aplica	Cordón Irregular		11	No aplica
	Socavado	11.1x4.4	Rechaza	Falta de fusión (entre)		7.93x1	Rechaza
	Cordón irregular (empalme)	3x11	No aplica	Socavado		3.6x1.6	ACEPTA
	Salpicadura	4	Rechaza	falta de fusión		1.2	Rechaza
	Falta Fusión(entre)	7x1.5	Rechaza	Porosidad (2)		0.4	Rechaza
	Medidas en Milímetros; Diam.: Diámetro					Socavado	5.5x2.7

▪ Resultados de Líquidos Penetrantes

Muestra	Tamaño mm	Indicación	Aceptación ASME VIII	Muestra	Tamaño mm	Indicación	Aceptación ASME VIII
1	3x2	Red.	Acepta	5	6x2	Red.	Rechaza
	6x5	Red.	Rechaza		3x1	Red.	Acepta
	11.5x4	Red.	Rechaza		2x2	Red.	Acepta
	3x3	Red.	Acepta		3x3	Red.	Acepta
	3x2	Red.	Acepta		4x1	Lineal	Rechaza
	5x2	Red.	Acepta		2x2	Red.	Acepta
	4x2	Red.	Acepta		4x2	Red.	Acepta
	4x6	Red.	Rechaza		2x1.6	Red.	Acepta
	0.7 C/u	Irrelev. (3)	No aplica		3.9	Red.	Acepta
2	2.8x1.6	Red.	Acepta	6	3.5x1.9	Red.	Acepta
	4.8	Red.	Acepta		2.7x1	Red.	Acepta
	2.38x1.5	Red.	Acepta		3.9	Red.	Acepta
	3.57x1.0	Lineal	Rechaza		8.7	Red.	Rechaza
	5.5x1.2	Lineal	Rechaza		3.9x1	Lineal	Rechaza
	6.4x4.8	Red.	Rechaza		10.3	Red.	Rechaza
	3.4x2.8	Red.	Acepta		1	Red.	Acepta
3	6x6	Red.	Rechaza	8	3.1x0.5	Lineal	Rechaza
	3.9x1.6	Red.	Acepta		2x1	Red.	Acepta
	5.8x5.8	Red.	Rechaza		2x3	Red.	Acepta
	3.5x1	Lineal	Rechaza		3	Red.	Acepta
	7.1x3.9	Red.	Rechaza		1.5x4	Red.	Acepta
	6.7x6.7	Red.	Rechaza		3	Red.	Acepta
4	3x3	Red.	Acepta	8	1x1.5	Red.	Acepta
	3.1x1.5	Red.	Acepta		1.2	Red.	Acepta
	10x4	Red.	Rechaza		5.2	Red.	Rechaza
	2x2	Red.	Acepta		4.3x2.7	Red.	Acepta
	5x1	Lineal	Rechaza		2x1	Red.	Acepta
	2x1	Red.	Acepta		4x2	Red.	Acepta
	5x2	Red.	Acepta		0.3x2	Lineal	Rechaza
	5x1.5	Lineal	Rechaza		1.19	Irrelev. (2)	No aplica
	7x7	Red.	Rechaza		Medidas en milímetros; Red.: Redondeada		

▪ Resultados de Inspección por Ultrasonido

Inspección	Indicación	Profundidad Da"	Recorrido Sa"	Superficial Pa"	Longitud mm	Aceptación ASME VIII 2
Muestra 1 Zapata 70°	1	0.029	3.381	3.323	11	Rechaza
	1a	0.007	1.665	1.592	12	Rechaza
Muestra 1 Zapata 60°	1	0.043	1.682	1.478	10	Rechaza
Muestra 2 Zapata 70°	1	0.223	2.406	2.300	6	Acepta
	2	0.086	2.985	2.854	7	Rechaza
	3	0.173	2.886	2.586	11	Rechaza
	1a	0.166	1.609	2.591	12	Rechaza
	2a	0.195	0.972	0.930	16	Rechaza
Muestra 3 Zapata 70°	1	0.002	3.272	3.129	16	Rechaza
	1a	0.004	1.625	1.554	40	Rechaza
	2a	0.048	1.807	1	20	Rechaza
Muestra 4 Zapata 70°	1	0.108	2.917	2.789	23	Rechaza
	1a	0.101	1.980	1.900	16	Rechaza
	2a	0.014	1.591	1.521	13	Rechaza
Muestra 5 Zapata 70°	1	0.156	2.742	2.626	16	Rechaza
	1a	0.024	1.557	1.489	10	Rechaza
	2a	0.110	1.261	1.206	11	Rechaza
	3a	0.028	1.541	1.474	9	Rechaza
Muestra 5 Zapata 60°	1	0.043	1.682	1.478	11	Rechaza
Muestra 6 Zapata 70°	1	0.037	3.291	3.147	8	Rechaza
	1a	0.14	1.660	1.587	53	Rechaza
Muestra 8 Zapata 70°	1	0.080	3.448	3.297	11	Rechaza
	1a	0.127	1.274	1.217	11	Rechaza
	2a	0.125	1.278	1.222	23	Rechaza
	3a	0.022	1.780	1.708	20	Rechaza
	4a	0.206	1.018	0.956	5	Acepta