

**ANÁLISIS COMPARATIVO CON PROCESOS DE SOLDADURA GMAW Y
GTAW GENERANDO FALLAS INDUCIDAS EN ACERO AL CARBONO ASTM A
53 GR B.**

MARILYN GIL RUBIANO



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA METALÚRGICA
TUNJA
2018**

**ANÁLISIS COMPARATIVO CON PROCESOS DE SOLDADURA GMAW Y
GTAW GENERANDO FALLAS INDUCIDAS EN ACERO AL CARBONO ASTM A
53 GR B.**

MARILYN GIL RUBIANO

**Trabajo de grado bajo la modalidad de investigación para optar el título de
Ingeniero Metalúrgico**

**Director: Ing. Ernesto Camargo Suarez
Especialista en Metalurgia y Ensayos no Destructivos**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA METALÚRGICA
TUNJA
2018**

Nota de aceptación:

Ing. Ernesto Camargo Suarez
Director

Ing. Fabio Raúl Pérez
Jurado

Ing. Humberto Saavedra
Jurado

Tunja, 22 de octubre de 2018

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación

Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Dios.

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que hacen parte de la gloriosa universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme culminar con éxito mis propósitos académicos.

De igual manera mis agradecimientos a mis profesores en especial al ingeniero Ernesto Camargo y al ingeniero Arcesio Medrano quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al ingeniero Herney Morantes que durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios, por ser la energía total del universo y que nos aporta sabiduría para obtener uno de mis anhelos más deseados.

A mis padres, por su dedicación, apoyo, amor, trabajo y sacrificio en todos estos años. Ha sido un orgullo y privilegio ser una de sus hijas, y les agradezco por su acompañamiento permanente. Son los mejores padres.

A mi hija, ya que por ella he decidido seguir este sueño, con el fin de brindarle un futuro mejor y una calidad de vida óptima.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral que me han brindado a lo largo de esta etapa, y ser ese empujoncito de ánimo, que me faltaba para cumplir esta meta.

A mis sobrinos y a Milenita quienes aportaron mucho con su preocupación, energía y apoyo.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	17
INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 ACERO AL CARBONO	21
2.2 ASPECTOS GENERALES DE LA SOLDADURA	21
2.3 PROCESOS DE SOLDADURA	22
2.3.1 Gmaw.	22
2.3.2 Gtaw.	24
2.4 VARIABLES ESENCIALES, NO ESENCIALES Y SUPLEMENTARIAS.....	26
2.5 CARACTERÍSTICAS PARA INDUCIR LA FALLA.....	27
2.6 TOLERANCIAS PARA DEFECTOS PREVISTOS	28
2.6.1 Tolerancia de trabajo).	28
2.6.2 Tolerancia de informe.	28
2.6.3 Punto de referencia.....	28
2.7 FABRICACION DE PROBETAS DE PRUEBA	28
2.7.1 Tipos de uniones y preparación de las piezas a soldar	28
2.7.1.1 Posiciones de soldeo	28
2.7.1.2 Preparación de las piezas a soldar.	29

2.8 DEFECTOS A INDUCIR	32
2.8.1 Porosidad	32
2.8.3 Cavidades:.....	34
2.8.4 Falta de fusiónl	34
2.8.5 Penetración de la raíz incompleta.	34
2.8.6 Porosidad tubular.....	34
2.8.11 Grietas de cráter)	35
2.8.12 Socavado.....	36
2.8.13 Penetración excesiva	36
2.8.14 Salpicaduras	36
2.8.15 Solapen.	37
2.9 CONTROL DE LAS SOLDADURAS	37
2.9.1 Ensayos no destructivos.	37
2.9.1.1 Inspección visual (VT).....	38
2.9.1.2 Inspección por líquidos penetrantes (PT).....	41
2.9.1.3 Inspección por partículas magnéticas (MT)).....	43
2.9.1.3.1 Métodos de imantación	43
2.9.1.4 Inspección por radiografía industrial (RT).	45
2.9.1.5 Inspección por ultrasonido (UT)	47
2.9.1.5.1 Técnicas de ensayo.	48
2.9.1.5.2 Procedimiento de transmisión	48
2.9.1.5.3 Procedimiento de pulso-ecol.	48
2.9.1.5.3 Palpadores.....	49
2.9.1.5.4 Selección de los Palpadores	49
2.9.1.5.5 Sistemas de representación.....	49
2.9.1.5.6 El A-scan	49
2.9.1.5.7 Coeficiente de atenuación.....	50

2.9.2 Ensayos Destructivos.	52
2.9.2.1 Ensayo de Metalografía:	52
2.9.1.7 Ensayo Tracción.	52
2.9.1.8 Ensayo de Doblez Guiado	52
3. ESTADO DEL ARTE.....	54
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	57
4.1 OBTENCIÓN	57
4.2 DISEÑO METODOLOGICO.....	58
5. ANALISIS Y RESULTADOS	59
5.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	59
5.1.1 Inspección visual preparación de las probetas.....	60
5.1.2 Inspección visual de la soldadura, diámetros internos y externos	63
5.1.3 Líquidos penetrantes	65
5.1.4 Partículas magnéticas.....	68
5.1.5 Radiografía industrial	71
5.1.6 Ultrasonido convencional	74
5.2 ANALISIS Y RESULTADOS.....	77
6. CONCLUSIONES.....	93
7. RECOMENDACIONES.....	95
9. BIBLIOGRAFÍA.....	96

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Equipo para soldadura GMAW.....	23
Ilustración 2: Posiciones de soldadura.....	29
Ilustración 3: Porosidad tubular.....	35
Ilustración 5: Probeta para el Ensayo de Dobleza Guiado.	53

TABLA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1: Corte de probetas.....	60
Fotografía 2: Preparacion del material.....	60
Fotografía 3: Diseño de junta.	60
Fotografía 4: Electrodo GTAW	60
Fotografía 5: Equipo multiprocesos GMAW - GTAW	60
Fotografía 6: Equipo multiprocesos material de aporte GMAW	60
Fotografía 7: Posición 5G.....	61
Fotografía 8: Inspeccion diseño de junta	61
Fotografía 9: Aplicación procesos de soldadura.	61
Fotografía 10: Adecuacion zona de trabajo	61
Fotografía 11: Aplicación pase de raíz.....	61
Fotografía 12: Aplicación pase de relleno.....	61
Fotografía 13: Posicion 5G.....	62
Fotografía 14: Inducción de discontinuidades.....	62
Fotografía 15: Verificación penetración de soldadura en probeta número 1.	62
Fotografía 16: Verificacion inducción de falla en el pase de raíz en probeta numero 1.....	62
Fotografía 17: Evaluación de socavado en la probeta número 5.	63
Fotografía 18: Evaluación de profundidad de porosidad en la probeta número 5.	63
Fotografía 19: Evaluación de profundidad de porosidad en la probeta numero 3.	63
Fotografía 20: Exceso de sobre espesor (soldadura a tope) en la probeta número 3.....	63
Fotografía 21: Evaluación de profundidad de porosidad en la probeta número 4.	63
Fotografía 22: Exceso de sobre espesor (soldadura a tope) y sovacado en la probeta número 1	63
Fotografía 23: Verificación diámetro interno, 3" SCH 80 para 4 probetas.	64
Fotografía 24: Verificación diámetro externo, 3" SCH 80 4 ptas.	64

Fotografía 25: Probeta número 3 sentido 0-3.	65
Fotografía 26: Probeta número 3 sentido 3-6	65
Fotografía 27: Probeta número 3 sentido 6-9.	65
Fotografía 28: Probeta número 3 sentido 9-0	65
Fotografía 29: Probeta número 4 sentido 0-3.	65
Fotografía 30: Probeta número 4 sentido 3-6.	65
Fotografía 31: Probeta número 4 sentido 6-9.	66
Fotografía 31: Probeta número 4 sentido 9-0	66
Fotografía 33: Probeta número 5 sentido 0-3.	66
Fotografía 34: Probeta número 5 sentido 3-6	66
Fotografía 35: Probeta número 5 sentido 6-9.	66
Fotografía 36: Probeta número 5 sentido 9-0.	65
Fotografía 37: Kit líquidos penetrantes.	67
Fotografía 38: Probeta número 3 sentido 0-3	68
Fotografía 39: Probeta número 3 sentido 3-6.	68
Fotografía 40: Probeta número 3 sentido 6-9	68
Fotografía 41: Probeta número sentido 9-0.	68
Fotografía 42: Probeta número 4 con yugo	68
Fotografía 43: Probeta número 4 sentido 0-3.	68
Fotografía 44: Probeta número 4 sentido 3-6	69
Fotografía 45: Probeta número 4 sentido 6-9.	69
Fotografía 46: Probeta número 4 sentido 0-9	69
Fotografía 47: Probeta número 5 sentido 0-3.	69
Fotografía 48: Probeta número 5 sentido 3-6.	69
Fotografía 49: Probeta número 5 sentido 3-6-9.	69
Fotografía 50: Probeta número 5 sentido 9-0	70
Fotografía 51: Equipo (yugo) partículas magnéticas.	70
Fotografía 52: Preparación para radiografía probeta número 1	71
Fotografía 53: Radiografía probeta número 1.	71

Fotografia 54: Preparación para radiografía probeta número 2.	71
Fotografia 55: Radiografía probeta número 2.	71
Fotografia 56: Preparación para radiografía probeta número 3.	71
Fotografia 57: Radiografía probeta número 3.	71
Fotografia 58: Radiografía probeta número 4A.	72
Fotografia 59: Radiografía probeta número 4B.	72
Fotografia 60: Probeta para el Ensayo de Doblez Guiado.	72
Fotografia 61: Radiografía probeta número 4C.	72
Fotografia 62: Preparación para radiografía probeta número 5.	73
Fotografia 63: Radiografía probeta número 5.	73
Fotografia 64: Fuente de rayos x.	73
Fotografia 65: Equipo rayos x.	73
Fotografia 66: Probetas 1, 2, 3.	74
Fotografia 67: Probetas 4, 5.	74
Fotografia 68: Probeta número 1.	74
Fotografia 69: Probeta número 2.	74
Fotografia 70: Probeta número 3.	74
Fotografia 71: Probeta número 4.	74
Fotografia 72: Probeta número 5.	75
Fotografia 73: Resultado ultrasonido probeta número 1.	75
Fotografia 74: Resultado espesor probeta número 2.	75
Fotografia 75: Resultado ultrasonido probeta número 3.	75
Fotografia 76: Resultado ultrasonico probeta número 4.	75
Fotografia 77: Resultado ultrasonico probeta número 5.	76
Fotografia 78: Puesta en práctica con equipo de ultrasonido convencional EPOCH 600.	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Variables esenciales, no esenciales y suplementarias	26
Tabla 2: Variables esenciales, no esenciales y suplementarias	27
Tabla 3: Ventajas y desventajas del ultrasonido.....	51
Tabla 4: Cambios de variables esenciales en los procesos de soldadura GTAW y GMAW	77
Tabla 5: Discontinuidades inducidas	78
Tabla 6: Especificaciones electrodo ER70S-6.....	79
Tabla 7: Sección 0-3 probeta numero 3	81
Tabla 8: Sección 3-6 probeta número 3	81
Tabla 9: Sección 6-9 probeta número 3	82
Tabla 10: Sección 9-0 probeta número 3	82
Tabla 11: Sección 0-3 probeta número 4	83
Tabla 12: Sección 3-6 probeta número 4	83
Tabla 13: Sección 6-9 probeta número 4	84
Tabla 14: Sección 9-0 probeta número 4	84
Tabla 15: Sección 0-3 probeta número 5	85
Tabla 16: Sección 3-6 probeta número 5	85
Tabla 17: Sección 6-9 probeta número 5	86
Tabla 18: Sección 9-0 probeta número 5	86
Tabla 19: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número uno – norma de aceptación para NDT.....	89
Tabla 20: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número dos – norma de aceptación para NDT.....	89
Tabla 21: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número tres – norma de aceptación para NDT.....	90
Tabla 22: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número cuatro – norma de aceptación para NDT.....	91

Tabla 23: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número cinco
– norma de aceptación para NDT.....92

TABLA DE ANEXOS

Anexo 1: ESPECIFICACIONES DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

W-009

Anexo 2: REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO (PQR) P-10656

Anexo 3: ENSAYOS MECANICOS

Anexo 4: PROCEDIMIENTO DE INSPECCION VISUAL

Anexo 5: PROCEDIMIENTO DE LIQUIDOS PENETRANTES

Anexo 6: PROCEDIMIENTO DE PARTICULAS MAGNETICAS

Anexo 7: PROCEDIMIENTO DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Anexo 8: PROCEDIMIENTO DE ULTRASONIDO CONVENCIONAL

Anexo 9: FICHA TECNICA ELECTRODO ER70S-6

Anexo 10: FICHA TECNICA EQUIPO TST 3500 SYN

Anexo 11: REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL SOLDADOR (WPQ)

RESUMEN

Este estudio determina el comportamiento de la soldabilidad con el cambio de variables esenciales, no esenciales y suplementarias, en los procesos de soldadura GTAW y GMAW en probetas de acero al carbono ASTM A53 gr B recolectadas del proyecto de construcción de una planta de tratamiento de agua en Termosuría – Ecopetrol ubicada en Villavicencio (Meta). El programa de ingeniería metalúrgica de la universidad pedagógica y tecnológica de Colombia tiene bastante reconocimiento a nivel nacional por la calidad de su programa. Por lo tanto, es de gran importancia el desarrollo de investigaciones que procuren facilitar el proceso de aprendizaje y entender de manera más oportuna, la causa de algunos defectos que se producen en la soldadura. Con este trabajo de investigación, se pretende verificar las características obtenidas en las probetas luego de hacer un cambio en el procedimiento de soldadura WPS “Welding procedure specification” que se sigue normalmente en la aplicación de los procesos soldadura mixta GTAW y GMAW

Para este fin, se elaboran probetas realizando modificaciones en el voltaje de diseño, caudal de gas, velocidad de avance y otras variables de soldadura que son fundamentales en el proceso para generar defectos de soldadura con el fin de realizar un análisis de control de calidad de las discontinuidades encontradas por medio de ensayos no destructivos como: inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía industrial, ultrasonido convencional.

Los resultados demuestran que al realizar las modificaciones a las variables de soldadura se producen defectos que se deben evitar en el proceso constructivo con la finalidad de incorporar una solución por medio de recomendaciones para no permitir que ocurran posibles daños en la puesta en marcha de las líneas de tuberías que tenga discontinuidades como las encontradas en este trabajo.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la soldadura como método de unión de dos piezas metálicas ha resultado ser un proceso vital en el desarrollo de las estructuras, fácil de emplear y con gran efectividad, implicando variables que deben ser consideradas detalladamente si se quiere un resultado óptimo. Hoy día la ciencia ha avanzado mucho en materia de soldadura, permitiendo la utilización de tecnologías vanguardistas como sistemas automatizados y procesos automáticos de gran velocidad, pero que en su mayor parte se realiza en taller o en campo¹. La principal fuente de inspiración para este trabajo fue el proyecto de construcción de una planta de tratamiento de agua en Termosuría - Ecopetrol Villavicencio (Meta) que crea la necesidad de realizar una investigación acerca de los cambios de las variables esenciales, no esenciales y suplementarias que realizan los soldadores al no tener en cuenta puntualmente las características del WPS "Welding procedure specification" que anteriormente fue calificado con su PQR "Procedure Qualification Record", y al no tener en cuenta estas especificaciones se presentaron defectos no deseados en la soldadura de la estructura metálica de la mencionada planta.

La presente investigación se enfoca en el análisis de soldabilidad con una probeta de referencia acero al carbono AISI A 53 gr B que cumple con todas las características relacionadas en el WPS "Welding procedure specification" aplicando procesos de soldadura mixtos GTAW y GMAW que se compara con otras probetas que se le realizan modificaciones controladas en las variables esenciales, no esenciales y suplementarias con el fin de inducir defectos que permiten generar una alternativa en base a los defectos que se encuentran en campo y así corroborar las

¹ MANUEL REINA GOMEZ. Soldadura de los aceros aplicaciones, Vol. 1, 4ta edición 2003 pág. 31,32

causas probables y dar recomendaciones en la aplicación de la soldadura mixta en las líneas de tubería que están en construcción, con el objeto de mejorar los resultados de la producción con mejores estándares de calidad que cumplan con criterios de aceptación y rechazo para este tipo de estructura metálica.

El presente trabajo quiere responder y aportar información a la comunidad científica e industrial en relación al comportamiento de la soldabilidad por el cambio de variables en los procesos de soldadura GTAW y GMAW en probetas de acero al carbono ASTM A53 gr B.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento de la soldabilidad por el cambio de variables en los procesos de soldadura GTAW y GMAW en probetas de acero al carbono ASTM A53 gr B.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar las probetas de acero al carbono ASTM A53 gr B el comportamiento de la soldabilidad mediante defectos inducidos con cambios en las variables esenciales a los procesos de soldadura GTAW y GMAW

Identificar por medio de ensayos no destructivos los defectos que se producen en el proceso de soldabilidad del material

Realizar un análisis de control de la calidad de las discontinuidades encontradas en las probetas y un análisis de probabilidad de detección

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ACERO AL CARBONO

El acero al carbono es un acero donde el principal componente de aleación intersticial es el carbono. El Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) define el acero al carbono como el siguiente: "Se considera que el acero es acero al carbono cuando no se especifica ni se requiere un contenido mínimo de cromo, cobalto, molibdeno, níquel, niobio, Titanio, tungsteno, vanadio o circonio, o cualquier otro elemento que se añada para obtener un efecto de aleación deseado"². Cuando el mínimo especificado para el cobre supere el 1.04 por ciento; o cuando el contenido máximo especificado para cualquiera de los siguientes elementos no exceda los porcentajes observados: manganeso 1.65%, silicio 0.60%, cobre 0.60%.

La tubería ASTM A53 Gr B está diseñada para aplicaciones mecánicas y de presión aceptable para usos ordinarios en líneas de vapor, agua, gas y aire. Es adecuado para la soldadura, y es adecuado para las operaciones de formación de bobinado, plegado y rebordeado, con sujeción a ciertas cualificaciones.³

2.2 ASPECTOS GENERALES DE LA SOLDADURA

La soldadura se define metalúrgicamente como una coalescencia localizada de metal donde esta se produce por calentamiento a una temperatura adecuada con o sin aplicación de presión y con o sin material de aporte. La unión rígida de partes o piezas metálicas se puede conseguir así:

² ASM. Metal Handbook, Volumen 6, 9na Edición pp. 79,81,126

³ ASTM A370. Standard Methods And Definitions For Mechanical Testing Of Steel Products. 1967 pp 327.

- Interponiendo la superficie de la junta, un metal o aleación que forme cuerpo con ella.
- Provocando la fusión o solidificación de las partes en contacto.
- Consiguiendo su enlace por reblandecimiento o compresión
- Por la simple acción de presiones elevadas

La industria y la ciencia ha tratado de usar todas las clases de energía conocidas, para unir o soldar los metales. Las clases de energía se pueden clasificar en cuatro grupos como los son: Eléctrica, Química, Óptica, Mecánica

2.3 PROCESOS DE SOLDADURA

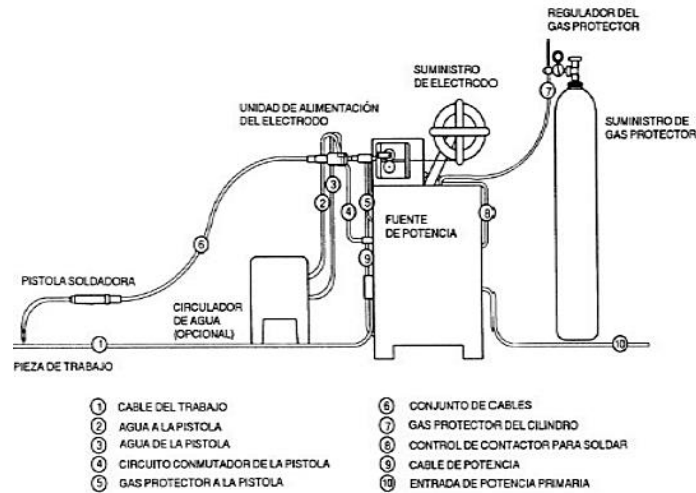
2.3.1 Gmaw: La soldadura por arco de metal y gas (gas metal arc welding, GMAW) es un proceso de soldadura por arco que emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo de gas suministrado externamente y sin aplicación de presión.⁴

El proceso se emplea con un gas protector sin aplicación de presión. La adición de metal de aporte es opcional. La protección del arco, se efectúa a través de un gas que puede ser inerte (Argón o Helio) proceso MIG: Metal Inert Gas; o activo (CO₂ o Mezcla Ar-CO₂) proceso MAG: Metal Active Gas. La AWS identifica a este proceso como GMAW: Gas Metal Arc Welding.⁵

⁴ TESIS ARMAS – PEÑAFIEL. Influencia del gas protector en el proceso de soldadura GMAW de aceros estructurales AISI 1008 y AISI 1045. Riobamba: ESPOCH, 2003. pp. 103-111

⁵ MILLER ELECTRIC. Gas Metal Arc Welding, 1era Edición pp. 3, 8.

Ilustración 1: Equipo para soldadura GMAW



Fuente: AWS en Welding Handbook, Welding Processes Part I

Este proceso necesita más elementos para poder soldar que los necesarios en otros procesos:

- Una fuente de corriente continua y tensión constante.
- Un devanador que alimente de manera continua el alambre macizo con mecanismo de tracción compuesto de uno o dos pares de rodillos.
- Una torcha, que está compuesta de un tubo de contacto donde el alambre recibe la corriente de soldadura proveniente de la fuente; una tobera de metal que direcciona el gas que protege la soldadura, un liner que está dentro de la torcha por donde pasa el alambre.
- Un tubo de gas y un regulador correspondiente

- Este proceso puede ser utilizado de 2 maneras: semiautomática (el soldador hace avanzar la torcha manualmente) y automatizada (el avance se hace mecánicamente). Permite soldar todos los metales ferrosos y no ferrosos.

Dentro de las Ventajas de este procedimiento tenemos:

- Velocidades de soldadura mayores a SMAW y GTAW.
- Mayor tasa de deposición horaria
- Se requiere mínima limpieza luego de soldar
- Puede utilizarse para soldar cualquier metal ferroso y no ferroso.
- En transferencia corto-circuito se puede soldar en toda posición.
- Se pueden realizar soldaduras de grandes longitudes sin que tengan empalmes entre los cordones, evitando imperfecciones.

Dentro de las Limitaciones de este procedimiento tenemos:

- El equipo para GMAW es más complejo, más costoso y menos portable que SMAW.
- El arco debe ser protegido de las corrientes de aire, por lo que su aplicación al aire libre es limitada.
- Es difícil de utilizar en juntas de difícil llegada.

2.3.2 Gtaw: Gas tungsten arc welding (GTAW) o Tungsten inert gas (TIG) GTAW El proceso de soldadura TIG (tungsten inert gas), identificado por la AWS como Gas Tungsten Arc Welding-GTAW, es un proceso de soldadura por arco eléctrico, que se establece entre un electrodo de tungsteno y la pieza a soldar, bajo la protección de un gas inerte que evita el contacto del aire con el baño de fusión y con el electrodo, que se encuentran a alta temperatura.

El electrodo de tungsteno está sujeto a una torcha que le transmite la corriente eléctrica e inyecta el gas de protección; puede estar refrigerada y es alimentada por una fuente de poder que puede ser de corriente continua o alterna. El metal de aporte, cuando es necesario, se agrega directamente a la pileta líquida⁶.

Dentro de las Ventajas de este procedimiento tenemos:

- Permite soldar en toda posición y todos los metales, a saber, aceros aleados, aluminio, magnesio, cobre, níquel y otros metales especiales, tales como el titanio y el circonio; es imprescindible para espesores finos.
- Debido a que el electrodo de tungsteno y el material de aporte son independientes.
- Genera un decapado de la capa de óxido que recubre los metales, refractaria en el caso del aluminio, mientras que el gas inerte evita la regeneración de la misma, lo que produce una soldadura limpia, sin escoria.
- No transfiere material a través del arco, por lo que no se producen salpicaduras.
- Permite al soldador ver bien la pileta líquida, con lo que podrá manejarla.
- Mantiene el arco aún con muy bajas corrientes, se puede soldar una amplia gama de espesores y hasta 4 mm de espesor sin preparación de bordes.
- Permite controlar la penetración, por lo que se usa para la pasada de raíz de finos y grandes espesores, luego se puede completar la junta con cualquier otro proceso.
- Aporta energía concentrada, con mínimas deformaciones y la zona afectadas al calor.

⁶ MILLER ELECTRIC. Gas Metal Arc Welding, Primera Edición 215994 2018, pp. 5

- Permite obtener soldaduras con la misma composición química y propiedades mecánicas que el metal base, cuando no hay material de aporte

Dentro de las limitaciones de este procedimiento tenemos:

- Velocidades de deposición son menores que aquéllas obtenidas con otros procesos de soldadura por arco eléctrico con consumible.
- Se requiere mayor habilidad del soldador que con electrodo revestido y MIG-MAG.
- Presenta baja tolerancia a los contaminantes de los consumibles o el metal base.

2.4 VARIABLES ESENCIALES, NO ESENCIALES Y SUPLEMENTARIAS

Las variables esenciales, no esenciales y suplementarias se denotan en el WPS y contienen las siguientes características:

Tabla 1: Variables esenciales, no esenciales y suplementarias

Párrafo	Variable Genérica	Párrafo	Variable genérica
QW – 402	Juntas	QW – 407	PWHT
QW – 403	Metales Base	QW – 408	Gas
QW – 404	Metales de Aporte	QW – 409	Características Eléctricas
QW – 405	Posiciones	QW – 410	Técnica
QW – 406	Pre calentamiento		

Fuente. BERGUI, Facundo. 1er COLOQUIO CHILENO DE SOLDADURA, [En línea]. En Calificaciones en Soldadura Código ASME Sección IX Organización Código ASME IX, Welding and Brazing Qualifications 2010 p.214 [consultado el 14 de septiembre de 2018] Disponible en Internet: https://www.academia.edu/26422609/Calificaciones_en_Soldadura_ASME_IX_Welding_and_Brazing_Qualifications

Tabla 2: Variables esenciales, no esenciales y suplementarias

Variable Esencial	Toda aquella que, al cambiar, afecta las propiedades mecánicas de la unión (No. P, No. F, espesor de metal depositado PWHT)
Variable esencial suplementaria	Toda aquella que, al cambiar, afecta las propiedades mecánicas de la unión (Grupo, posición, PWHT)
Variable no esencial	Toda aquella que, al cambiar, no produce efectos sobre las propiedades mecánicas' (diseños de junta, técnica)

Fuente. Ibid., p.214

Para el proceso GMAW, las variables se tuvieron en cuenta al QW 255 y para el proceso de soldadura GTAW de acuerdo al QW 256 del código ASME sección IX-2017

2.5 CARACTERÍSTICAS PARA INDUCIR LA FALLA

Es aceptable producir defectos usando cualquier proceso, siempre que el defecto resultante se distinga por sus características NDT⁷.

Los resultados de NDT son confiables según el tipo específico de falla en la muestra de prueba. Por lo tanto, la localización de la falla depende de su posición y tipo en la muestra de prueba junto con sus características. Por estas razones, los defectos incorporados en la muestra de prueba deben ser representativos del tipo de falla que se busca en la misma.

⁷ The American Society for Nondestructive Testing, Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 10, Overview, New York, 2012..

2.6 TOLERANCIAS PARA DEFECTOS PREVISTOS

Se deben usar las siguientes tolerancias:⁸

2.6.1 Tolerancia de trabajo: La diferencia aceptable entre el defecto requerido y las dimensiones finales del defecto. (Si la ubicación del defecto es incorrecta, pero aún cumple con la tolerancia de trabajo, debe aceptarse).

2.6.2 Tolerancia de informe: El tamaño real medido de la falla.

2.6.3 Punto de referencia: Una marca fija en la muestra de prueba donde se mide la posición y el tamaño de la falla

2.7 FABRICACION DE PROBETAS DE PRUEBA

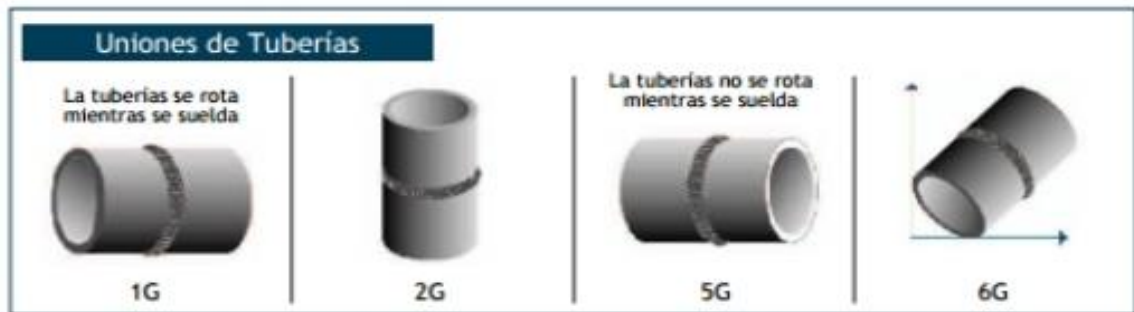
2.7.1 Tipos de uniones y preparación de las piezas a soldar

2.7.1.1 Posiciones de soldeo: en su principio cualquier tipo de junta podrá soldarse en cuatro posiciones diferentes. Dichas posiciones son⁹

- Horizontal, se rota la tubería mientras se suelda (posición: 1G)
- Vertical (posición: 2G)
- Horizontal, no rota la tubería mientras se suelda (posición: 5G)
- A 45° respecto a la horizontal (posición: 6G)

⁸ The American Society of Mechanical Engineers, Rules For Construction of Pressure Vessels, International Code, ASME Boiler and Pressure Vessel Committee Subcommittee on Pressure Vessels BPVC-VIII-1, New York, 2014.
⁹ASME QW- 461.3. American society mechanical engineers.USA.secc IX. 2007

Ilustración 2: Posiciones de soldadura.



Fuente. <http://todo-soldadura.blogspot.com/2011/07/posiciones-de-soldadura.html>

En general la clasificación se aplica principalmente a la hora de juzgar la habilidad de los soldadores u operadores de máquina de soldeo y también cuando se trata de soldadura de responsabilidad. La ASME QW- 405 y otras especificaciones, distinguen las posiciones cuando se trata de soldar chapas o tuberías, tanto a tope como en ángulo.

2.7.1.2 Preparación de las piezas a soldar. Una vez escogido cualquier proceso de soldadura, para la manufacturación o reparación de elementos metálicos, se debe preparar el trabajo en forma tal que garantice el logro de una unión soldada de óptima calidad. Por tal razón La preparación de las piezas a soldar tiene dos pasos¹⁰:

- Selección de la forma de la unión
- Diseño de la junta

En cuanto a la forma de unión, hay cinco maneras fundamentales de lograr la unión de dos piezas y se diferencian entre sí como se coloca una en relación de la otra,

¹⁰ Welding metallurgy. 4th ED. Miami American Welding Society,2007

estas son: en ángulo, de solape, por el borde, y en filete. La selección de la forma de la unión depende del diseño de la pieza a fabricar y de la necesidad que se quiere satisfacer. En cuanto diseño de la junta, se puede afirmar que es una parte vital para cualquier proceso de soldadura. La seguridad y la vida útil de una estructura soldada dependen de la eficiencia de la junta.

El factor determinante de la junta, es la condición de servicio a las que se van estar sometidas las piezas soldadas. Debido a diferentes condiciones de operación, una junta puede ser excelente para una aplicación y completamente inapropiada para otra. Un diseño adecuado ayuda a controlar la distorsión, reduce la posibilidad de agrietamiento, facilita el trabajo del operario y produce soldaduras sanas a bajo costo.

Las juntas que van hacer sometidas a erosión o corrosión, tienen que ser diseñadas de forma que el embalaje quede libre de irregularidades y hendiduras, para efectos de protegerla de cualquiera de estas formas de ataque.¹¹

Hay que considerar la manera como se aplican los esfuerzos durante el servicio, los cuales pueden presentar en forma de tensión, compresión, doblez y torsión. Ciertos diseños de juntas son apropiados únicamente para soportar esfuerzos en una dirección, mientras otros son apropiados para utilizarlos cuando los esfuerzos son variables o impredecibles. Se requieren diferentes diseños dependiendo de la carga si es estática, dinámica o combinación de las dos y por ello se debe tener en cuenta el cambio paulatino de las propiedades mecánicas del material que ocurre con el servicio a través del tiempo.

¹¹ LINCOLN ELECTRIC. Procedure Handbook Of Arc Welding. Edición Especial pp. 4.1-2, 13.3-3

Otro factor que afecta el diseño de una junta, es la eficiencia requerida. El termino eficiencia de la junta se utiliza para indicar la resistencia de la junta soldada expresada en porcentaje de la resistencia del metal base¹².

Hay tres tipos de ensambles o juntas soldadas:

- Chaflán
- Filete
- Una combinación de las anteriores.

La determinación del método más apropiado está influenciada por la facilidad de la operación, por los costos, las condiciones de servicio y por el diseño mismo de la estructura a fabricar en base a uniones soldadas.

Cuando se trabaja con materiales realmente delgados y cuando las cargas a que se van a estar expuestas las estructuras soldadas son estáticas, el ensamble con chaflán cuadrado dan resultados muy satisfactorios y es muy económico por cuanto no requiere una preparación costosa de las piezas a soldar. Sin embargo, está limitado por el espesor de la junta. Cuando el espesor de la junta aumenta, hay necesidad de biselar los bordes de las piezas para efecto de darle a la soldadura un acceso adecuado de tal manera que se puedan lograr sueldas sanas y resistentes.

¹³

En la soldadura por arco eléctrico está influenciado por dos factores:

- La preparación de la junta
- El consumo del metal de aporte.

¹² American Society of Mechanical Engineers - Boiler and Pressure Vessel Code - Section IX, 2007

¹³ HORWITZ H. Enciclopedia de la soldadura, Tomo I. Ediciones PC pp. 49-50

Los ensambles con bisel en V minimizan el consumo de la soldadura y se deben utilizar cuando la preparación de las juntas es costosa, es decir, cuando el espesor de la pieza a unir es considerable. Una desventaja de los ensambles hechos con bisel en V y en X es la dificultad de obtener soldaduras sanas por no formar escoria en el proceso GTAW / GMAW debido a la presencia de bordes no inclinados en la junta.

La selección de la apertura de raíz y del ángulo de bisel está influenciada por el tipo de metal utilizado, por la localización de la junta en la estructura soldada, por el consumo de soldadura y los requerimientos de la junta soldada.

2.8 DEFECTOS A INDUCIR

2.8.1 Porosidad: Con el cambio del estado líquido al sólido, se reduce la solubilidad con la caída de la temperatura. Esto provoca que se desarrolle un volumen adicional de gas en un momento en que el metal se vuelve líquido y por lo tanto incapaz de permitir que el gas escape libremente. El atrapamiento del gas causa bolsas de gas y porosidad en la soldadura final. El tipo de porosidad dentro de una soldadura generalmente se designa por la cantidad y distribución de los poros¹⁴.

2.8.2 Inclusiones de tungsteno: Las inclusiones de tungsteno están asociadas al proceso GTAW, que emplea electrodos de tungsteno para generar el arco. Si el electrodo de tungsteno hace contacto con la pileta líquida, el arco puede extinguirse y el metal fundido puede solidificar alrededor de la punta del electrodo.

¹⁴ The American Society for Nondestructive Testing, Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 10, Overview, New York, 2012.

Hasta que se remueva, la punta del electrodo va a estar muy quebradiza y va a ser “incluida” en la soldadura si no es removida mediante un amolado. Las inclusiones de tungsteno pueden también ocurrir cuando la corriente usada para el proceso GTAW es excesiva de aquella recomendada para un diámetro particular de electrodo. En este caso, la densidad de corriente puede ser tan grande que el electrodo empieza a descomponerse y pedazos de él pueden depositarse en el metal de soldadura¹⁵. Esto también puede ocurrir si el soldador no despunta adecuadamente la punta del electrodo de tungsteno. Si las marcas del amolado están orientadas de manera que formen anillos alrededor del electrodo en lugar de estar alineadas con su eje, pueden formar concentración de tensiones que pueden provocar que la punta del electrodo se rompa. Otros motivos para que ocurran inclusiones de tungsteno pueden ser:¹⁶

- Contacto de la parte de la punta del electrodo con el metal fundido
- Contaminación de la punta del electrodo con salpicaduras
- Extensión de los electrodos más allá de sus distancias normales desde la boquilla, resultando en un sobrecalentamiento del electrodo
- Ajuste inadecuado de la boquilla
- Flujo inadecuado del gas de protección o turbulencias excesivas que provocan la oxidación de la punta del electrodo
- Uso de un gas de protección inadecuado
- Defectos en el electrodo como fisuras
- Uso de una corriente excesiva para el tamaño de electrodo dado

¹⁵https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/3._Discontinuidades_en_Metal_Base_y_Soldadura.pdf

¹⁶ DISCONTINUIDADES DEL METAL BASE Y DE LA SOLDADURA, ASNT NDT Level III Services Ing. Adalberto Ruiz LL.2010

- Mal amolado del electrodo
- Uso de un electrodo demasiado pequeño

2.8.3 Cavidades: Se pueden crear al quitar el protector de arco durante la soldadura, como crear un arco largo, interrumpir el gas protector o una combinación de ambos. Mojar un área del electrodo de soldadura y llevar a cabo una ejecución de soldadura típica y asegurar que el área humedecida del electrodo de soldadura se haya consumido puede crear cavidades finas

2.8.4 Falta de fusión: La fusión incompleta también puede surgir de una corriente de soldadura demasiado alta cuando la alta velocidad de fusión favorece que el soldador use una velocidad de soldadura excesiva. El defecto reduce considerablemente la resistencia de una junta sujeta a carga estática, y bajo carga cíclica o de choque es bastante grave.

Se elige el área donde se requiere la falta de fusión y aplique un recubrimiento no metálico tal como un crayón con una temperatura de 900 ° C o superior. Suelde sobre esta área como normal. Alternativamente, este proceso puede usarse para crear falta de fusión en el área de la raíz.

2.8.5 Penetración de la raíz incompleta: Es causada por el electrodo mantenido en un ángulo incorrecto, un electrodo de diámetro demasiado grande, una velocidad de desplazamiento demasiado rápida, una corriente de soldadura insuficiente o una preparación inadecuada de la junta (por ejemplo, desalineación de la junta).

2.8.6 Porosidad tubular: Algunas inclusiones de gas tienen una forma alargada conocida como tubos u orificios de gusanos. Por lo general, son casi perpendiculares a la superficie de la soldadura. Pueden ser el resultado del uso de fundente mojado en polvo o de una corriente de soldadura inadecuada. Otra forma

típica de tubería aparece como una rama de un árbol (Fig. 2). Estos pueden ser causados por el uso de electrodos de soldadura húmedos.

Ilustración 3: Porosidad tubular



Fuente. [Http://senocorp.com.ec](http://senocorp.com.ec)

2.8.11 Grietas de cráter: Como su nombre lo indica, las grietas del cráter ocurren en el cráter de soldadura formado al final de un pase de soldadura. En general, este tipo de grietas se debe a que no se llena el cráter antes de romper el arco. Cuando esto sucede, los bordes exteriores del cráter se enfrían rápidamente, produciendo tensiones suficientes para romper el interior del cráter. Este tipo de grietas puede estar orientado longitudinalmente o transversalmente, o puede ocurrir como un número de grietas que se cruzan y que forman la forma de una estrella. Las grietas longitudinales del cráter pueden propagarse a lo largo del eje de la soldadura para formar una grieta en el eje central. Además, tales grietas pueden propagarse hacia arriba a través de la soldadura si no se eliminan antes de aplicar pases posteriores. Estos pueden ser producidos por la extracción rápida de los electrodos de soldadura después de una corta soldadura. (Un tubo de cráter también puede ocurrir usando este método)¹⁷

¹⁷ Acosend, «Congreso de Soldadura y Ensayos no Destructivos,» vol. Vol 1, 2013.

2.8.12 Socavado: Durante el pase final o tapa, los bordes superiores expuestos de la preparación de soldadura biselada tienden a derretirse y a correr hacia el metal depositado en la ranura de soldadura. El resultado es una ranura, que puede ser intermitente o continua, con bordes más o menos afilados a lo largo del refuerzo de la soldadura.

2.8.13 Penetración excesiva: Pasos

- Seleccione un área en la raíz de la soldadura donde se requiere una penetración excesiva. Completar la soldadura de la raíz de la soldadura dejando el área donde se requiere una penetración excesiva sin soldar.
- Viste los extremos de los cordones de soldadura adyacentes al área no soldada para formar cráteres poco profundos.
- Aumente la corriente de soldadura de 20 a 30 amperios y, manteniendo el electrodo vertical a la superficie del material, comience desde un extremo del área no soldada hacia un cráter y luego retroceda al otro cráter.

2.8.14 Salpicaduras: Enmascare el área donde se requiere la salpicadura y aplique una pulverización anti-salpicaduras sobre la superficie del material sin máscara. Retire la máscara y suelde con SMAW o GMAW con una configuración de corriente mayor que la normal y una mayor longitud de arco antes de la última soldadura. Complete la soldadura con la configuración normal. Alternativamente, coloque una

pieza de metal sobre la ranura de soldadura y suelde este material como se indicó anteriormente¹⁸.

2.8.15 Solape: Se produce cuando la varilla de soldadura se ha utilizado con un ángulo incorrecto, el electrodo ha viajado demasiado lento o la corriente era demasiado baja. Soldar en posición vertical u horizontal usando una velocidad de soldadura más lenta que la normal puede crear superposición.

2.9 CONTROL DE LAS SOLDADURAS

2.9.1 Ensayos no destructivos. Los ensayos no destructivos permiten controlar la calidad de la estructura soldada sin destruir ni alterar su capacidad de servicio. Mediante ensayos de esta naturaleza pueden detectarse los defectos, tanto superficiales o internos, que se encuentran normalmente en una soldadura, cuando el procedimiento o la técnica operatoria no son adecuadas¹⁹.

En la industria los ensayos no destructivos se usan cada vez más porque no genera cambios físicos ni químicos, entre sus principales aplicaciones se encuentran: ²⁰

- Detección de discontinuidades (internas y superficiales).
- Determinación de composición química.
- Detección de fugas.
- Medición de espesores y monitoreo de corrosión.
- Adherencia entre materiales.

¹⁸ The American Society for Mechanical Engineers, Estándar E1316 Terminología para exámenes no destructivos, 2013.

¹⁹ The American Society for Nondestructive Testing, Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 10, Overview, New York, 2012.

²⁰ The American Society for Nondestructive Testing, Recommended Practice No. SNT-TC-1A, 2016 Edition, and ASNT Standard Topical Outlines for Qualification of Nondestructive Testing Personnel (ANSI/ASNT CP-105-2016), 2016.

- Inspección de uniones soldadas.

En la actualidad se dispone de una gran variedad de técnicas y aparatos de ensayo que permiten obtener información muy efectiva sobre la seguridad de las soldaduras. Estas técnicas suelen ser más recomendables que los ensayos destructivos, particularmente cuando se trata de uniones soldadas de gran tamaño y elevados costos.²¹

Para este caso se aplicarán los ensayos no destructivos en las probetas.

2.9.1.1 Inspección visual (vt). Es el método de prueba que revela o detecta cierto tipo de discontinuidades superficiales, usando el ojo humano en cualquier ensayo de control de calidad. La inspección visual es un método por el cual se mide las dimensiones de la soldadura aplicada en el material base cumpliendo las normas de aceptación y rechazo de las mismas.

La inspección visual es un método para la inspección de la soldadura, por ello se incluye una inspección cuidadosa antes, durante y después de la soldadura. Esto constituye un escalonamiento de un determinado número de ítems usados cada día, sin pensar como fueron ellos fabricados hasta que hay un problema con uno de ellos. Muchos de esos ítems involucran soldadura en su construcción. Unas de las

²¹ LIPPOLD John &.KOTECKI Damian. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel. EE.UU: John Wiley & Sons Inc, 2005. pp. 8-19

aplicaciones de soldadura relacionada a la ingeniería de la construcción en proyectos civiles, es la soldadura en estructuras²².

Inspección antes de empezar a soldar. Gastar un tiempo en inspección antes de iniciar a soldar, previene errores y facilita el progreso del trabajo. Copias de los planos estructurales y planos de construcción y montaje deben ser obtenidas y revisados. Prioritariamente al comenzar cualquier trabajo, los planos de fabricación y montaje a ser utilizados, deben ser marcados como aprobados.

Una revisión de los requerimientos de material para el proyecto, debe realizarse y verificarse. Los certificados de calidad deben ser obtenidos y el método de identificación y marca del acero debe ser determinado. La selección de los electrodos de soldadura debe ser determinada y el método de almacenamiento de consumibles de soldadura debe ser revisado.

Una inspección debe efectuarse, para estar seguro que todos los procedimientos de soldadura son precalificados y cubiertos por un procedimiento de soldadura especificado (WPS) o que el procedimiento de soldadura ha sido calificado, de acuerdo al código de soldadura aplicable. Copias de todos los procedimientos de soldadura especificados deben ser obtenidas para los récords del proyecto.

Inspección durante la soldadura. La que ofrece el más grande desafío al inspector. La gerencia de fabricación o montaje pueden haber desarrollado excelentes procedimientos y secuencias de soldadura y suministrar esta información al superintendente de planta o campo para la instrucción y la de su personal, pero,

²² The American Society of Mechanical Engineers, Estándar de Aceptación para Inspección visual. ASME BPVC-V, 2017.

frecuentemente se encuentra que esta información no ha sido suministrada, o en algunas ocasiones tan solo parcialmente. La línea de comunicación del ingeniero de soldadura, al superintendente, al supervisor y al soldador, frecuentemente se ve interrumpida. Consecuentemente, deficiencia en los cordones de soldadura ocasionada por la falta de conocimiento de los procedimientos de soldadura apropiados o la secuencia de estos, resulta en costos y trabajos extras. El superintendente y el supervisor son a veces menos conscientes de los peligros de no seguir los procedimientos y de los riesgos de no producir las toneladas de trabajo de soldadura prescrita²³.

Es necesario verificar que la soldadura sea efectuada de acuerdo con los procedimientos aprobados y los requerimientos de las especificaciones o códigos. Una simple omisión de un paso en un procedimiento de soldadura, puede cambiar una soldadura de completa penetración a parcial penetración.

Inspección después de la soldadura. Es frecuentemente la parte más fácil del trabajo del inspector. Una parte de esta inspección es asegurar que todas las juntas, hayan sido soldadas y que los cordones tengan el tamaño correcto, mientras se verifica la cantidad de las soldaduras, se inspecciona por segunda vez la calidad de las mismas. La calidad de la soldadura es continuamente chequeada durante el trabajo, de esta manera, la inspección posterior a la soldadura llega a ser un doble chequeo, una revisión de los planos de fabricación y montaje debe realizarse, para determinar que todas las soldaduras han sido aplicadas y que tienen el tamaño correcto, el acabado y la longitud. Es necesario, verificar que no hayan sido

²³ The American Society for Nondestructive Testing, ASNT Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel (ANSI/ASNT CP-189-2016) & ASNT Std. Topical Outlines for Qualification of NDT Personnel (ANSI/ASNT CP-105-2016), 2016.

aplicadas soldaduras no especificadas en los planos y las que están requeridas tengan el tamaño correcto.²⁴

Además de la cantidad las soldaduras deben ser inspeccionadas por la calidad. Los cordones deben estar libres de grietas, falta de fusión y no tener excesiva porosidad superficial o socavados.

2.9.1.2 Inspección por líquidos penetrantes. Aplicar un líquido sobre la superficie de la muestra. El líquido penetra por fenómenos de capilaridad en las discontinuidades. Una vez eliminado el exceso de penetrante, de la superficie de la muestra, solamente quedará el líquido atrapado en las discontinuidades, el cual se exuda de las mismas, y con la ayuda de un revelador puede poner de manifiesto la presencia de discontinuidades. El examen puede solo realizarse con un líquido que moje la superficie de la muestra. En este caso, las moléculas del líquido prefieren acercarse a las moléculas de la pared. En el caso contrario, las moléculas del líquido se acercan a otras de su misma naturaleza y la mojabilidad no ocurre²⁵.

Con esta técnica se detectan defectos superficiales mediante el empleo de líquidos coloreados de gran fluidez. Estos líquidos se penetran fácilmente en los defectos superficiales, por una acción de capilaridad. La aplicación posterior de un revelador adecuado extrae el líquido coloreado de las cavidades en que se encontraba, localizado el y perfilando el contorno del mismo. Por ello podemos detectar discontinuidades abiertas a la superficie en materiales poros, en metales ferrosos y

²⁴ Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Ensayos no Destructivos. Inspección Visual. Principios Generales UNE-EN 13018, 2016.

²⁵ The American Society for Mechanical Engineers, Método de Ensayo para el Examen por Líquidos Penetrantes Visibles Usando Procesos Removibles con Solvente ASME E 165, 2013.

no ferrosos. Esta inspección con líquidos penetrantes depende del estado de limpieza superficial, la configuración de la discontinuidad, el tamaño de la discontinuidad, la tensión superficial y el poder humectante.

La capilaridad es la fuerza impulsora que lleva al líquido al interior de la grieta de radio r es debida a la tensión superficial μLV , actúa a un ángulo de contacto α y es igual a $(2\pi r \mu LV \cos \alpha)$.

Cuando la grieta se encuentra en la superficie superior, las fuerzas correspondientes a la acción de la capilaridad y al peso del penetrante son aditivas. Por tanto, presiona los gases en el fondo de la discontinuidad.

Cuando la grieta se encuentra en la superficie inferior, las fuerzas correspondientes a la acción de la capilaridad y al peso del penetrante son opuestas, por consiguiente, la siguiente ecuación²⁶:

$$h = \frac{2\pi r \mu LV \cos \alpha}{rg\rho}$$

h : La altura de penetración del líquido

g : Gravedad

ρ : Densidad del líquido

²⁶ ASME T-670. American society mechanical engineers. USA. secc V. 2007

Para realizar el ensayo se limpia la superficie de la pieza a examinar con (Cleaner) o limpiador para eliminar la grasa, óxidos, pinturas, etc. Que perjudicarían los resultados del ensayo, luego se cubre con una fina película de líquido penetrante (Dye penetrant). Se espera durante un lapso de 10 a 15 minutos, para que el penetrante pueda fluir hacia el interior de los posibles defectos, posteriormente se vuelve a limpiar la superficie de la pieza. En este momento solo queda sobre la pieza el penetrante retenido en el interior de los defectos. A continuación, se aplica el revelador (Developer), se espera que extraiga el líquido penetrante almacenado en las imperfecciones de la pieza. Si existe algún defecto superficial, el colorante retenido en el mismo fluye hacia el exterior y sobre el revelador aparece una mancha que indica la situación, forma de dicho defecto.

El método de líquidos penetrantes resulta particularmente indicado para la detección de defectos superficiales en metales no férricos, tales como aluminio y cobre, bronce y entre otros.

2.9.1.3 Inspección por partículas magnéticas. La inspección por partículas magnéticas es un método para localizar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos. Limitaciones que deben tenerse en cuenta, por ejemplo, las películas delgadas de pintura y otros recubrimientos no magnéticos tales como los galvanostegicos, afectan adversamente la sensibilidad de la inspección. Además, el método solo es útil en materiales ferromagnéticos²⁷

2.9.1.3.1 Métodos de imantación: En la inspección de piezas metálicas (ferromagnéticas) se toma ventaja del campo magnético generado por corrientes

²⁷ Guidebook for the Fabrication of Non-Destructive Testing (NDT) Test Specimens, TRAINING COURSE SERIES No. 13, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2001

eléctricas. Aunque se puede usar imanes permanentes, esto se utiliza poco porque normalmente se requieren campos fuertes. Las técnicas de ensayo se pueden clasificar según si se mantienen o no las fuerzas magnéticas durante la aplicación del medio de inspección, así se tiene el método residual y el método continuo.

De acuerdo con el carácter del campo utilizado los métodos pueden ser:

- método circular o circunferencial
- método longitudinal
- método paralelo
- método de espiral o campo de distorsión
- combinación de los anteriores

El ensayo por partículas magnetizables es utilizado en la localización de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Puede aplicarse tanto en piezas acabadas como en semi- acabadas y durante las etapas de fabricación.

El proceso consiste en someter la pieza, o parte de esta, a un campo magnético. En la región magnetizada de la pieza, las discontinuidades existentes, o sea, falta de continuidad de las propiedades magnéticas del material, acusarán un campo de flujo magnético. Con la aplicación de partículas ferromagnéticas, ocurrirá una aglomeración de estas en los campos de fuga, una vez que son atraídas debido al surgimiento de polos magnéticos. La aglomeración indicará un contorno del campo de fuga, forneciendo la visualización del formato y de la extensión de la discontinuidad.

2.9.1.4 Inspección por radiografía industrial. Es un proceso de ensayo de materiales, que usa radiación penetrante. Esto permite examinar el interior de los objetos o montajes que son opacos a la luz.

La radiografía y gammagrafía, forman parte de los ensayos no destructivos puesto que los objetos que son ensayados, no son dañados ni alterados en sus propiedades y pueden usarse inmediatamente después del ensayo, sin que exista ningún impedimento.

Al pasar la radiación a través de los materiales, parte de esta es absorbida o transformada. La cantidad de absorción es dependiente del espesor y el número atómico del material ensayado.

La variación en intensidad del haz de radiación emergente del material, se puede registrar en imágenes visuales permanentes o indicaciones fotográficas llamadas radiografías o indicaciones en contadores Geiger.

Los tres elementos esenciales en el proceso radiográfico son²⁸:

- La fuente de radiación, usualmente X o Gamma
- El objeto a ser ensayado
- La película

²⁸ ASME E-94 .American society mechanical enginners.USA.secc V. 2007

Una radiografía es un registro fotográfico producido sobre una película por la exposición a los rayos X o Gamma (gammagrafía).

La densidad de un área cualquiera de la radiografía depende de la cantidad de radiación recibida por la emulsión de la película siendo directamente proporcional el efecto. Existen límites tanto inferiores como superiores dentro de los cuales deben mantenerse el contraste o diferencia de densidades entre dos zonas adyacentes para que la aparición de detalles sea más fácil y se vean mejor.

Una forma de pantalla intensificadora consiste en una lámina de plomo, o una capa delgada del compuesto de plomo (óxido de plomo) revestida uniformemente sobre un soporte de papel.

Bajo la excitación de los rayos X de corta longitud de onda y de rayos gamma, el plomo es un buen emisor de electrones, los cuales actúan sobre la sensibilidad de la película, incrementando el efecto fotográfico total. Otra forma de pantalla intensificadora consiste en un producto químico fluorescente en polvo. Por ejemplo, tungstanato de calcio, mezclado con un aglutinante adecuado y revestido sobre una cartulina o plástico. Así se convierte parte de la energía de los rayos X en luz, a la cual la película es muy sensible. La radiación dispersa tiende a nublar la **Fotografía** de una radiografía, pero se puede reducir utilizando pantallas de plomo, máscaras y filtros²⁹.

En nuestro caso se aplicará la radiografía industrial en el control de calidad de las soldaduras por lo tanto el desarrollo de nuevas técnicas de soldadura que se han

²⁹ www.aendur.ancap.com

motivado con una alteración bien acentuada en los proyectos metal – mecánicos. Tales técnicas permiten reparaciones en placas y equipos, con gran economía para la industria. Un riguroso control de las soldaduras es indispensable para que sus defectos sean localizados y reparados evitándose eventuales prejuicios y accidentes.

El ensayo de las soldaduras puede ser hecho por la técnica radiográfica cuyo objetivo será verificar la presencia o ausencia de discontinuidades y defectos en la masa del metal depositado o en las zonas adyacentes. La radiografía permite coleccionar una documentación del ensayo con registro permanente, ventaja no común en otros ensayos no destructivos.

2.9.1.5 Inspección por ultrasonido. La prueba de ultrasonido consiste en una eficaz propagación de las ondas de baja amplitud a través de un material para medir el tiempo de viaje de dicha onda y cualquier cambio de intensidad para una distancia dada. Este ensayo se realiza con la ayuda de un transductor acústico el cual es acoplado en la superficie de un material. Este sensor, contiene un elemento piezo-eléctrico, cuya función es convertir pulsos eléctricos en vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia en el rango de los Megahertz. El fenómeno de lectura ocurre cuando las ondas atraviesan el material y son reflejadas en la pantalla del dispositivo o escáner, este haz reflejado muestra picos que indican el tamaño, la profundidad y la localización exacta de las discontinuidades ³⁰

³⁰ The American Petroleum Institute, Cambio de Radiografía Por Ultrasonido-API STANDARD 650, apéndice U, 2013.

Aplicaciones incluyen la medición de distancias, detección de fallas y la medición de parámetros que están relacionados con la estructura del material³¹. Defectos en la superficie y en la subsuperficial de los metales se pueden detectar usando este ensayo, localizar y medir en la inspección ultrasónica, incluyendo defectos demasiado pequeños para ser detectados por otros métodos no destructivos.³²

2.9.1.5.1 Técnicas de ensayo: Una onda ultrasónica incidente en un parte se refracta y en otra se refleja, existe una variación de la resistencia a la onda sonora, como en el caso de que exista un defecto en el material.

2.9.1.5.2 Procedimiento de transmisión: Evalúa la parte del ultrasonido que ha sido transmitido a través de la pieza que se está inspeccionando. A un lado de la pieza se aplica un emisor y al otro lado un receptor; cuando la onda encuentra un defecto, la intensidad sonora en el receptor disminuye a causa de la reflexión.

2.9.1.5.3 Procedimiento de pulso-eco: Utiliza la porción reflejada del sonido para la detección de discontinuidades. El oscilador piezoeléctrico funciona a la vez como emisor y receptor. Como la energía recibida es mucho menos que la emitida, no se trabaja sobre la base de sonido continuo, empleándose solo impulsos de sonido. La onda sonora penetra el material hasta que encuentre una superficie límite de reflexión parcial o total.

³¹ BLITZ, J. SIMPSON, G. Ultrasonic methods of non-destructive testing. 2 ed. U.S.A. Champman & Hall.1996. 261 p. ISBN 0 412 60470 1

³² The American Society of Mechanical Engineers, Métodos de Examen Ultrasónico para Materiales y Fabricación, ASME SECCIÓN V, ARTICULO 5 MÉTODOS DE EXAMEN ULTRASÓNICO PARA MATERIALES Y FABRICACIÓN T-510 ALCANCE, 2010.

En este método se puede medir el tiempo de recorrido y además como se conoce la velocidad del sonido de la mayor parte de los materiales, se puede establecer la distancia entre el oscilador y la superficie refractante.

2.9.1.5.3 Palpadores: Forman parte inseparable del ensayo y muchos de los resultados dependen de la combinación equipo-palpador. Consta básicamente de un transductor, carcasa, amortiguador y capa de adaptación³³.

2.9.1.5.4 Selección de los Palpadores: El palpador debe seleccionarse teniendo en cuenta las condiciones planteadas por el material y la forma de la pieza, así como por los requerimientos de ensayo, como, por ejemplo, el menor tamaño de defecto que se desea detectar.

En primer lugar, se debe seleccionar la frecuencia con la cual se va a realizar el ensayo y a partir de ésta determinar las dimensiones del palpador de control más adecuado. Hay Palpadores o transductores de incidencia normal y de incidencia angular, estos pueden ser de un solo cristal, de doble cristal y de múltiples cristales y se escogen de acuerdo a las condiciones dadas

2.9.1.5.5 Sistemas de representación: Hay tres tipos básicos de representación de pantallas TRC para ensayos de ultrasonido, los cuales son representación A-scan, B-scan y C-scan.

2.9.1.5.6 El A-scan: El A-scan muestra la presentación de la cantidad de energía ultrasónica recibida en función del tiempo. La cantidad relativa de energía recibida

³³ BLITZ, J. SIMPSON, G Op. cit., p. 220

se traza a lo largo del eje vertical y el tiempo transcurrido se muestra a lo largo del eje horizontal. En la A-scan, el tamaño de la discontinuidad relativa puede ser estimado mediante la comparación de la amplitud de la señal obtenida de un reflector de desconocidos a la de un reflector conocido. La profundidad del reflector se puede determinar la posición de la señal en el barrido horizontal³⁴

2.9.1.5.7 Coeficiente de atenuación: La atenuación es la pérdida progresiva de la energía de la señal ultrasónica. A medida que el haz ultrasónico viaja dentro del material, va perdiendo energía debido a la resistencia que opone la estructura del material. Como consecuencia, en la técnica pulso-eco, el pico correspondiente a la reflexión en la superficie posterior será cada vez de una amplitud menor a medida que la onda realiza viajes de ida y vuelta³⁵. Este coeficiente de atenuación es un parámetro del efecto de la microestructura del material en las ondas ultrasónicas. A través de la determinación precisa de este coeficiente se pueden determinar algunas variables micro estructurales como el tamaño de grano o la influencia de éste en el material. La atenuación es sinónimo de la pérdida de energía. Cuando una onda acústica se propaga a través de un material, su amplitud disminuye conforme aumenta la distancia recorrida.

Entre los diferentes mecanismos de pérdida de la intensidad acústica tenemos:

- Absorción: disipación fundamental de la energía en forma de calor.
- Dispersión: pérdida causada por las características micros estructurales de material: tamaño de grano, límite de grano, textura, etc.

³⁴ AEND. Ultrasonido. 1 ed. España. Fundación confemetal. 2002. 205 p. ISBN. 84.96169.8

³⁵ VALENCIA. J. Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio

- Divergencia del haz: esta pérdida es causada por la naturaleza de onda de un haz ultrasónico y que este diverge en forma de cono produciendo pérdidas de la intensidad acústica de la onda.

La dispersión y la absorción son los mecanismos de pérdida de energía que gobiernan la atenuación en el rango de frecuencias de interés para caracterizar la mayoría de los materiales con aplicación en ingeniería³⁶.

Ventajas y desventaja del ultrasonido. Las Principales ventajas y desventajas del ensayo por ultrasonido las encontramos en la siguiente tabla:

Tabla 3: Ventajas y desventajas del ultrasonido.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es sensible a las discontinuidades superficiales y subsuperficiales.	La superficie debe ser accesible para transmitir ultrasonido.
La profundidad de penetración para la detección de fallas es alta.	Requiere acoplamiento medio para promover la transferencia de energía de sonido en la muestra de ensayo.
Sólo el acceso de un solo lado es necesario cuando la pulso-eco técnica se utiliza.	Los materiales que son de forma irregular, muy pequeños o no homogéneos son difíciles de inspeccionar.
Imágenes detalladas pueden ser producidas con sistemas automatizados.	Defectos lineales orientados paralelamente al haz de sonido puede no ser detectada.
Tiene otros usos, tales como la medición de espesores, además de la detección de defectos.	Los patrones de referencia son necesarios para la calibración y la caracterización de los defectos

Fuente: The American Petroleum Institute, Cambio de Radiografía Por Ultrasonido-API STANDARD 650, apéndice U, 2013.

³⁶<http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/123456789/6384/1/DETERM-1.PDF>

2.9.2 Ensayos Destructivos: Determinan las características mecánicas de los materiales. La pieza experimenta desde una deformación.

2.9.2.1 Ensayo de Metalografía. Es el estudio de las características estructurales o de constitución de un metal o una aleación para relacionar ésta con las propiedades físicas y mecánicas³⁷:

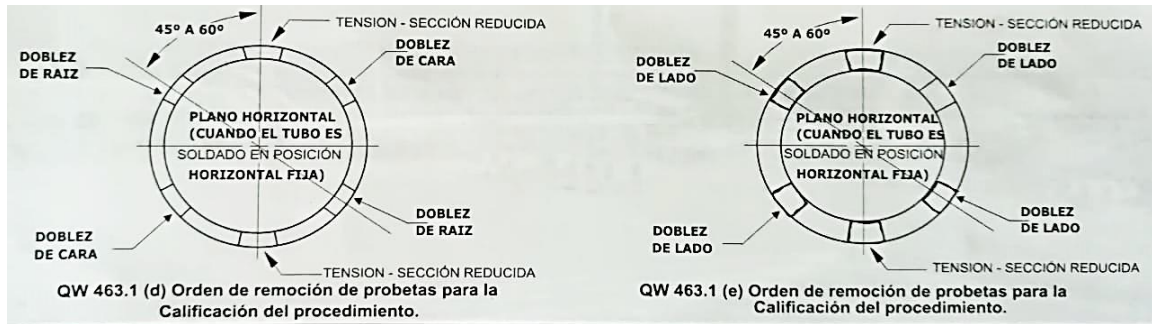
2.9.1.7 Ensayo Tracción. Consiste en someter las probetas normalizadas a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de las probetas. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. cómo se ilustra en la figura 3.

2.9.1.8 Ensayo de Doblez Guiado. La prueba de doblez guiado se efectúa aplicando una carga hasta el doblez completo (en forma de U) de una probeta, a través de un yugo colocado en el centro de la misma, las dimensiones del yugo son establecidas por la norma que se esté aplicando en el proyecto, esta probeta es apoyada en sus extremos.

La prueba de doblez guiado es aplicada a determinadas muestras de materiales soldados, para analizar el comportamiento y maleabilidad de los materiales de aporte aplicados a los materiales, así mismo nos ayudan a determinar la habilidad del operario que está aplicando la soldadura. Así mismo se utiliza para realizar la calificación del procedimiento de soldadura. Como se muestra en figura 4.

³⁷ ASTM E 407. American society testing and materials. USA. 2007

Ilustración 4: Probeta para el Ensayo de DobleZ Guiado.



Fuente: ASME QW-463.1. American society mechanical engineers.USA.secc IX.

2007

3. ESTADO DEL ARTE

En las décadas recientes se ha incrementado el interés en el uso de soldaduras mixtas en la industria, principalmente con el objetivo de aportar mejores propiedades mecánicas y disminuir costos en reparaciones en la producción. Actualmente, se han realizado un gran número de investigaciones que pretenden la implementación de nuevos procesos de soldadura en la industria metalmeccánica.

Los procesos de soldadura GTAW y GMAW son de gran importancia debido a su alta coalescencia con el material base y su mayor eficiencia en los resultados de la soldadura, la cual representa mundialmente con innumerables proyectos de soldadura con dichos procesos, considerándose entonces muy importante en la industria para proyectos metálicos de gran magnitud. En la antigüedad desde la edad de hierro se determinó la necesidad de unir piezas soldadas para la construcción de estructuras de acero. Dichos usos han trascendido a lo largo del tiempo. Sin embargo, el uso de procesos de soldadura GTAW y GMAW data alrededor de hace 70 años, en los cuales se han obtenido avances respecto a características estructurales y su propiedad de generar soldaduras limpias y con mejoras en sus propiedades mecánicas dando paso a la creación de nuevos componentes metálicos de mayor calidad. En la actualidad, la demanda de estos materiales de aporte se ha ido incrementando por tener mayor efectividad en los materiales e infinidad de productos metálicos que se pueden realizar.

El uso y la implementación de los mencionados procesos de soldadura ha sido una solución a diferentes problemas principalmente en la unión de diferentes materiales metálicos, debido a que estos son una alternativa de aporte a la industria. Recientes investigaciones han sido enfocadas al uso de soldaduras mixtas en estructuras

metálicas; debido a su disponibilidad en varios sectores de la industria donde se emplean soldaduras de este tipo para mejorar su efectividad en el servicio³⁸.

En la actualidad los procesos de soldadura por arco eléctrico más utilizado en la industria. Al trabajar con uno o más alambres continuos permite un rápido avance en el trabajo, con elevadas densidades de corriente en el electrodo, lo que da una elevada tasa de deposición de material, dando como resultado una alta productividad. Estos aspectos han conducido a un aumento progresivo en el uso de estos procesos en los países desarrollados, en donde la disminución del número de soldadores junto a la necesidad de una productividad más alta ha causado la sustitución de la soldadura con electrodo revestido en algunos usos³⁹.

En las construcciones metálicas obtenidas mediante la aplicación de soldadura, está presente la posibilidad en mayor o menor grado de la pérdida de la forma geométrica de la estructura, la no coincidencia de bordes, desplazamientos apreciables, etc., debido al calentamiento no uniforme que se manifiesta durante la realización de la junta en el cordón y zonas próximas al mismo⁴⁰, al emplear una fuente de calor móvil fuertemente concentrada, como puede ser un arco eléctrico, ocurren procesos físico-químicos, estructurales y deformaciones térmicas de diversa índole que producen tensiones residuales, particularmente en el cordón y en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT)⁴¹.

³⁸ Herry Horwitz, P.E. "Soldadura, Aplicación y práctica", Representaciones y servicios de Ingeniería, México, 2001

³⁹ R. Rowel, L. Jeffus, "Manual de soldadura", Ed. Paraninfo, España, pp. 54-56,2008.

⁴⁰Welding, Brazing and Soldering", Vol. 16, Matching, American Society for metals, 1989, Ohio, USA.

⁴¹MANUAL TECNICO DE SOLDADURA.- AMERICAN WELDING SOCIETY- Prentice Hall.-1994

Fue en 1924 cuando se registró la primera patente GTAW por los americanos Devers y Hobard. Con los años ha ido evolucionando y avanzando y actualmente éste es el procedimiento más adecuado cuando se persigue obtener cordones de soldadura con calidad, siendo una técnica compleja que requiere personal con formación especializada⁴².

En las últimas décadas, se sumó una nueva técnica para lograr la unión en barras de acero de refuerzo, conocida como Soldadura a Gas y Presión (SGP). Esta técnica tiene sus orígenes en los Estados Unidos de América, y se extendió hacia Alemania y Rusia, hasta llegar al Japón⁴³.

En el 2015 se realiza publicaciones acerca de La detección de defectos en las uniones soldadas que es vital y describimos los defectos más habituales en las uniones soldadas utilizadas en la fabricación de construcciones soldadas⁴⁴.

⁴² De Buen, O. (1969), "Nociones de Metalurgia de la Soldadura", Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F., enero, 1969.

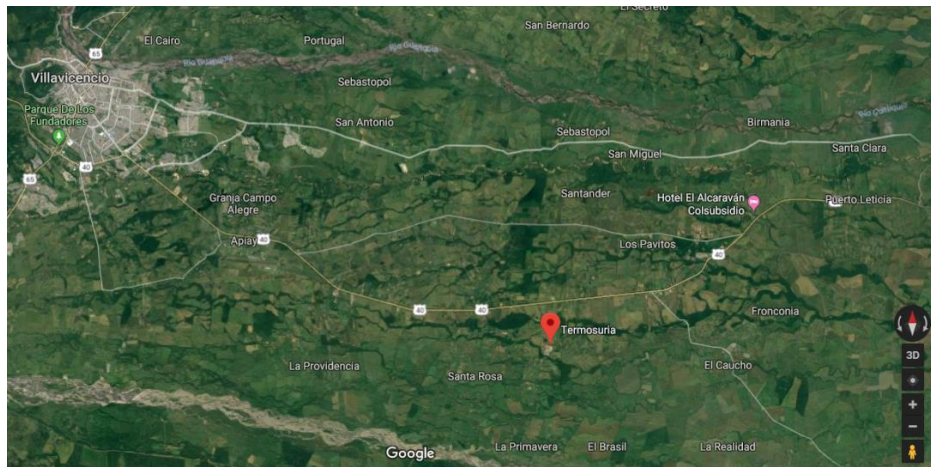
⁴³ Sociedad de Soldadura a Gas y Presión del Japón, (1996b), "Manual de Soldadura a Gas y Presión", Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, Marzo, pp. 15.

⁴⁴ <https://www.seas.es/blog/varios/defectos-internos-en-soldadura-parte-1/>

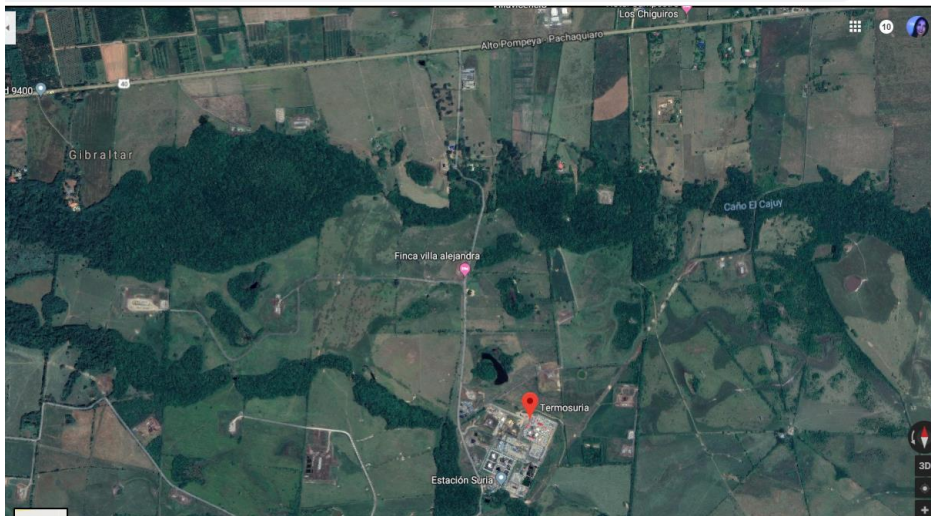
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 OBTENCIÓN

Obtener las probetas del material ASTM A 53 gr B de acero al carbono ubicada ubicada en la termoeléctrica de Suria gerencia de operaciones Apiay departamento del meta y perteneciente a la vicepresidencia regional Orinoquia Ecopetrol S.A. planta Termosuria

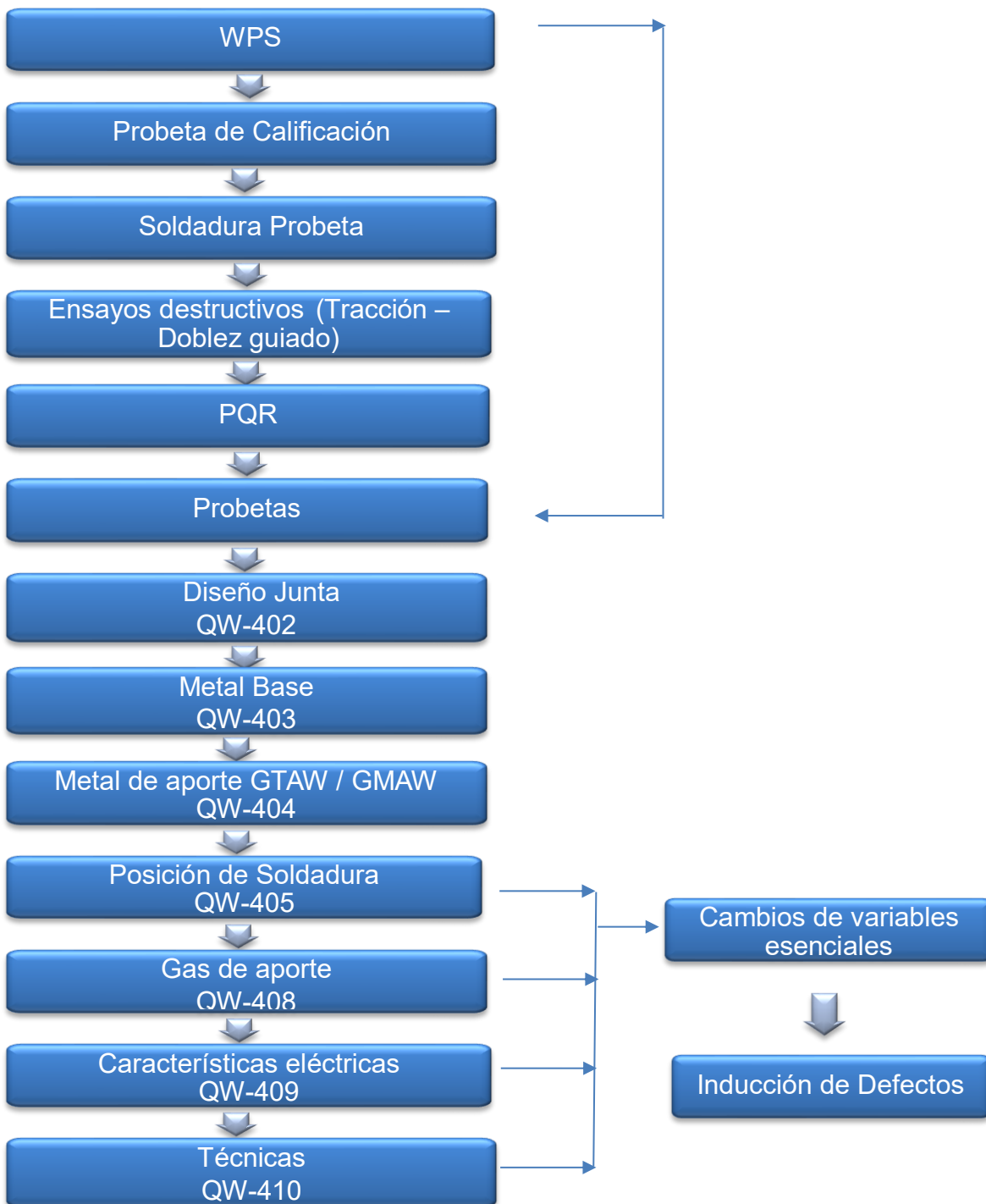


Imágenes ©2018 Landsat / Copernicus, DigitalGlobe, CNES / Airbus, DigitalGlobe. Datos del mapa ©2018 Google Colombia Condiciones Enviar comentarios 2 km



Imágenes ©2018 CNES / Airbus, Datos del mapa ©2018 Google Colombia Condiciones Enviar comentarios 200 m

4.2 DISEÑO METODOLOGICO



5. ANALISIS Y RESULTADOS

5.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Se realiza la inspección antes de la soldadura teniendo en cuenta criterios como:

- Verificación de WPS, PQR y WPQ
- Establecer puntos de espera
- Revisar la documentación del material base y del material de aporte
- Verificación del material de aporte
- Verificar punteado y alineación de la unión

Durante la soldadura:

- Verificar la conformidad con la especificación del procedimiento de soldadura WPS
- Inspección de pase de raíz de la soldadura
- Inspección en los pases de soldadura
- Inspección en el lado posterior antes de soldar

Después de soldar

- Inspeccionar la calidad de la superficie soldada
- Verificar las dimensiones de la soldadura
- Verificar la exactitud dimensional
- Revisar requisitos subsiguientes (NDT)

Esta inspección se realizó en sentido horario teniendo en cuenta parámetros de demarcación en las probetas (0-3-6-9)

5.1.1 Inspección visual preparación de las probetas



Fotografía 1: Corte de probetas



Fotografía 2: Preparación del material



Fotografía 3: Diseño de junta



Fotografía 4: Electrodo GTAW



Fotografía 5: Equipo multiprocesos GMAW-GTAW



Fotografía 6: Equipo multiprocesos material de aporte GMAW



Fotografía 7: Posición 5G



Fotografía 8: Inspección diseño de junta



Fotografía 9: Aplicación procesos de soldadura



Fotografía 10: Adecuación zona de trabajo



Fotografía 11: Aplicación pase de raíz



Fotografía 12: Aplicación pase de relleno



Fotografía 13: Posición 5G



Fotografía 14: Inducción de discontinuidades



Fotografía 15: Verificación penetración de soldadura en probeta número 1



Fotografía 16: Verificación inducción de falla en el pase de raíz en probeta número 1

5.1.2 Inspección visual de la soldadura, diámetros internos y externos



Fotografía 17: Evaluación de socavado en la probeta número 5



Fotografía 18: Evaluación de profundidad de porosidad en la probeta número 5



Fotografía 19: Evaluación falta de cordón de presentación en la probeta número 3



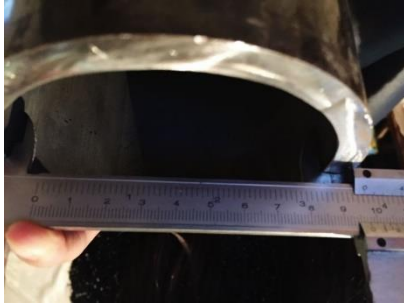
Fotografía 20: Exceso de sobre espesor (soldadura a tope) en la probeta número 3



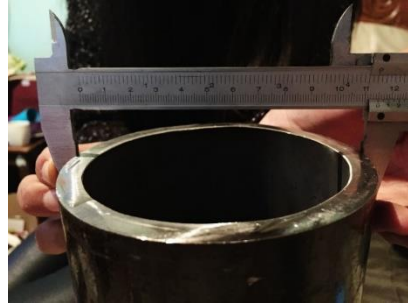
Fotografía 21: Evaluación de profundidad de porosidad en la probeta número 4



Fotografía 22: Exceso de sobre espesor (soldadura a tope) y socavado en la probeta número 1



Fotografía 23: Verificación diámetro interno, 3" SCH 80 para 4 probetas



Fotografía 24: Verificación diámetro externo, 3" SCH 80 para 4 probetas

5.1.3 Líquidos penetrantes



Fotografía 25: Probeta número 3 sentido 0-3



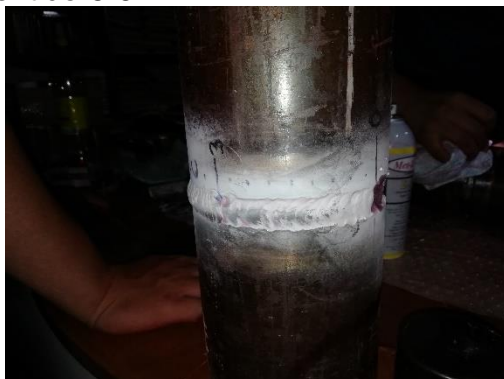
Fotografía 26: Probeta número 3 sentido 3-6



Fotografía 27: Probeta número 3 sentido 6-9



Fotografía 28: Probeta número 3 sentido 9-0



Fotografía 29: Probeta número 4 sentido 0-3



Fotografía 30: Probeta número 4 sentido 3-6



Fotografía 31: Probeta número 4 sentido 6-9



Fotografía 32: Probeta número 4 sentido 9-0



Fotografía 33: Probeta número 5 sentido 0-3



Fotografía 34: Probeta número 5 sentido 3-6



Fotografía 35: Probeta número 5 sentido 6-9

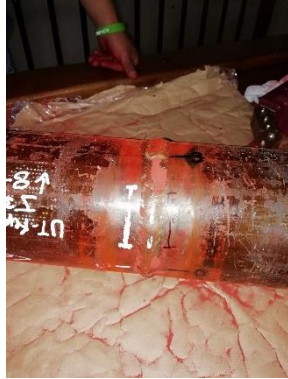


Fotografía 36: Probeta número 5 sentido 9-0



Fotografía 37: Kit líquidos penetrantes

5.1.4 Partículas magnéticas



Fotografía 38: Probeta número 3 sentido 0-3



Fotografía 39: Probeta número 3 sentido 3-6



Fotografía 40: Probeta número 3 sentido 6-9



Fotografía 41: Probeta número 3 sentido 9-0



Fotografía 42: Probeta número 4 Con Yugo



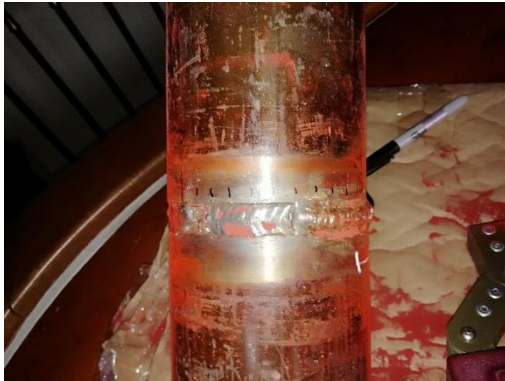
Fotografía 43: Probeta número 4 sentido 0-3



Fotografía 44: Probeta número 4 sentido 3-6



Fotografía 45: Probeta número 4 sentido 6-9



Fotografía 46: Probeta número 4 sentido 0-9



Fotografía 47: Probeta número 5 sentido 0-3



Fotografía 48: Probeta número 5 sentido 3-6



Fotografía 49: Probeta número 5 sentido 3-6-9



Fotografía 50: Probeta número 5
sentido 9-0

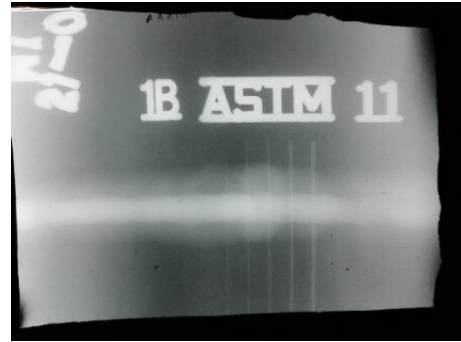


Fotografía 51: Equipo (yugo)
partículas magnéticas

5.1.5 Radiografía industrial



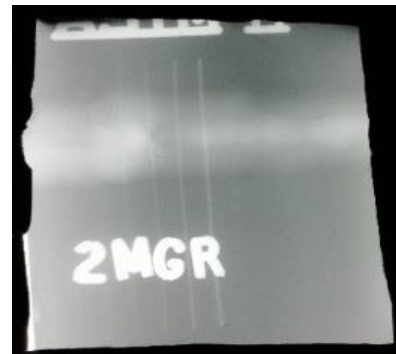
Fotografía 52: Preparación para radiografía probeta número 1



Fotografía 53: Radiografía probeta número 1



Fotografía 54: Preparación para radiografía probeta número 2



Fotografía 55: Radiografía probeta número 2



Fotografía 56: Preparación para radiografía probeta número 3



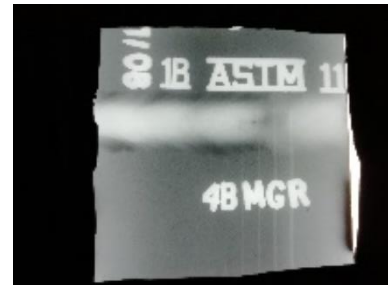
Fotografía 57: Radiografía probeta número 3



Fotografía 58: Radiografía probeta número 4A



Fotografía 59: Preparación para radiografía probeta número 4



Fotografía 60: Radiografía probeta número 4B



Fotografía 61: Radiografía probeta número 4C



Fotografía 62: Preparación para radiografía probeta número 5



Fotografía 63: Radiografía probeta número 5



Fotografía 64: Fuente de rayos x



Fotografía 65: Equipo rayos x

5.1.6 Ultrasonido convencional



Fotografía 66: probetas 1, 2, 3



Fotografía 67: probetas 4, 5

En la **Fotografía**



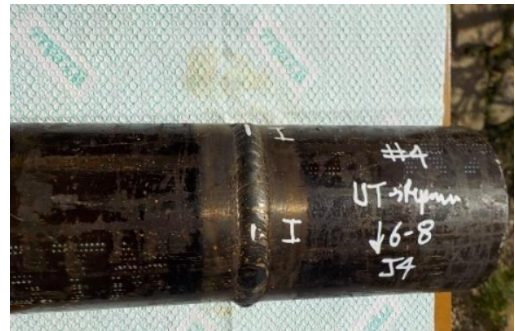
Fotografía 68: probeta número 1



Fotografía 69: probeta número 2



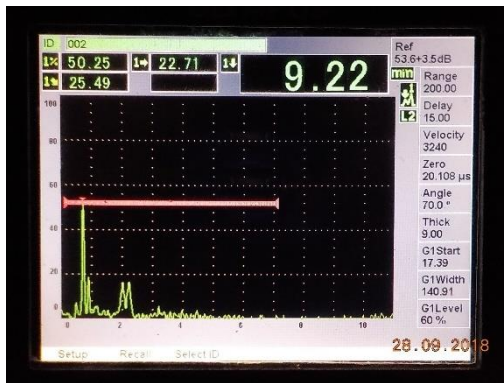
Fotografía 70: probeta número 3



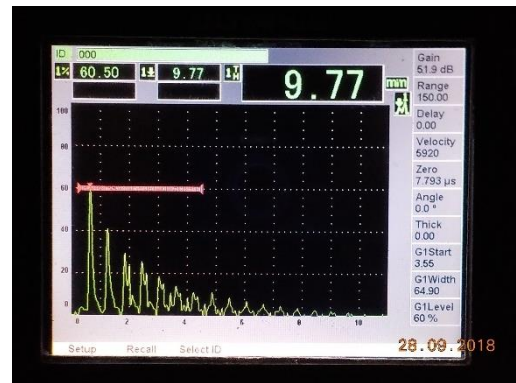
Fotografía 71: probeta número 4



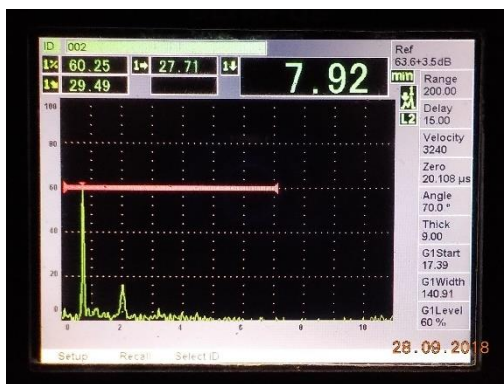
Fotografía 72: probeta número 5



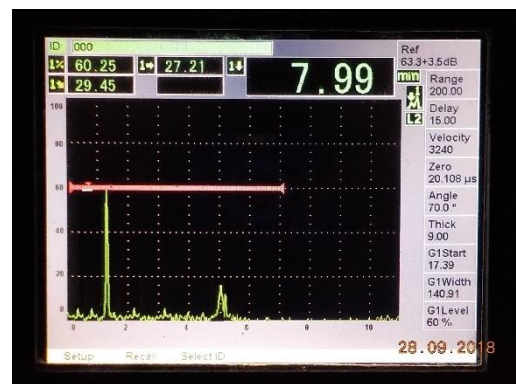
Fotografía 73: Resultado ultrasonido probeta número 1



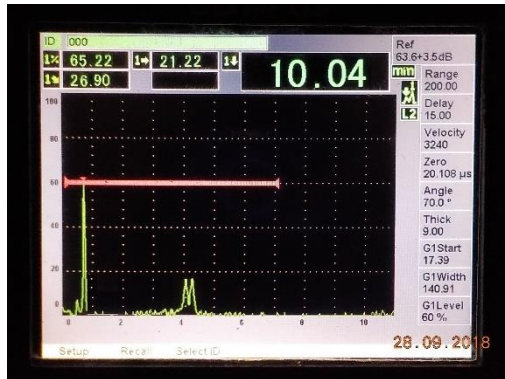
Fotografía 74: Resultado espesor probeta número 2



Fotografía 75: Resultado ultrasonido probeta número 3



Fotografía 76: Resultado ultrasonido probeta número 4



Fotografía 77: Resultado ultrasonido probeta número 5



Fotografía 78: Puesta en práctica con equipo de ultrasonido convencional EPOCH 600

5.2 ANALISIS Y RESULTADOS

Tabla 4: cambios de variables esenciales en los procesos de soldadura GTAW y GMAW

PROBETA NUMERO	PASE	VARIACIÓN	PROCESO DE SOLDADURA	METAL APORTE	CORRIENTE	
					TIPO Y POLARIDAD	AMPERAJE O VOLTAJE DE DISEÑO (AMPERIOS)
C2	RAÍZ	REF	GTAW	ER 70S-6	DCEN	100 – 150
	RELLENO	REF	GMAW	ER 70S-6	DCEN	100 - 130
	PRESENTACIÓN	REF	GMAW	ER 70S-6	DCEN	90 - 120
C1	RAÍZ	↑ (25%)	GTAW	ER 70S-6	DCEN	125 - 187.5
	RELLENO	↑ (25%)	GMAW	ER 70S-6	DCEN	125 – 162,5
	PRESENTACIÓN	↑ (25%)	GMAW	ER 70S-6	DCEN	112,5 - 150
C3	RAÍZ	↓ (25%)	GTAW	ER 70S-6	DCEN	75 – 112,5
	RELLENO	↓ (25%)	GMAW	ER 70S-6	DCEN	75 – 97.5
	PRESENTACIÓN	↓ (25%)	GMAW	ER 70S-6	DCEN	67,5 - 90
PROBETA N°	PASE	VARIABLE	PROCESO DE SOLDADURA	METAL O GAS DE APORTE	RANGO REF.	RANGO DE LA PRUEBA
C4	RAÍZ	Caudal gas	GTAW	Argón 100%	9-15 L/min	5-9 L/min
	RELLENO	Caudal gas	GMAW	Argón 100% y 2% CO2	9-15 L/min	5-9 L/min
	PRESENTACIÓN	Caudal gas	GMAW	Argón 100% y 2% CO2	9-15 L/min	5-9 L/min
C5	RAÍZ	Velocidad de avance	GTAW	ER 70S-6	2 - 6 IPM	6 - 9 IPM
	RELLENO	Velocidad de avance	GMAW	ER 70S-6	2 - 6 IPM	6 - 9 IPM
	PRESENTACIÓN	Velocidad de avance	GMAW	ER 70S-6	2 - 6 IPM	6 - 9 IPM

DC-EP = corriente directa

Tabla 5: Discontinuidades inducidas

No probeta	sección	longitud inspección	Defecto		radiografía	Líquidos penetrantes	Inspección visual	Partículas magnéticas	Tipo de proceso
			Ensayo	ultrasonido					
1	0-3	9.5cm	-	ok	-	-	ok	-	GTAW y GMAW
	3-6	9cm	S, C, Sc	S	S, C, Sc	ok	S	ok	
	6-9	9cm	-	ok	-	-	ok	-	
	9-0	9cm	-	ok	-	-	ok	-	
2 ref.	0-3	9.5cm	-	ok	ok	-	ok	-	GTAW y GMAW
	3-6	9cm	-	ok	ok	-	ok	-	
	6-9	9cm	-	ok	ok	-	ok	-	
	9-0	9cm	-	ok	ok	-	ok	-	
3	0-3	9.5cm	Sc, M, Fp, Fm, C, F	Fp, P	Sc, S, C, F	Sc, M, Fp, Fm	Sc, M, Fp, Fm	Sc, M, Fp, Fm	GTAW y GMAW
	3-6	9cm	Sc, F, P, C	Ok	-	Sc, F, P	Sc, F, P, C	Sc, F, P, C	
	6-9	9cm	Fm, Sc, I, P, F	Ok	-	Fm, Sc, I, P, F	Fm, Sc, I, P, F	Fm, Sc, I, P, F	
	9-0	9cm	Fm, I, M, P, Sc, C	Ok	-	Fm, I, M, P, Sc	Fm, I, M, P, Sc, C	Fm, I, M, P, Sc, C	
4	0-3 (A)	9 cm	Sc, C, I, P, F, Fp	F, Fp	Sc, C, P, I	Sc, I, P, F, Fp	Sc, C, I, P, F, Fp	Sc, C, I, P, F, Fp	GTAW y GMAW
	3-6 (B)	9.5 cm	C, P, Fp, Sc, S, I,	F	C, P, Fp, Sc	Sc, S, I,	C, P, Fp, Sc, S, I,	P, Sc, S, I,	
	6-9 (C)	8 cm	Sc, C, S, P, Fm	F	C, Fm, I, P, S	Fm, I, P	C, Fm, I, P, S	C, Fm, I, P	
	9-0	10 cm	Sc, C, P	ok	-	Sc, Fp, Fm, P	Sc, C, P,	Sc, P	
5	0-3	13.5 cm	Sc, C, P, Fp, I	ok	-	M, I, Fp, Sc	Sc, M, I, Fp, C	Sc, M, I, P	GTAW y GMAW
	3-6	14.5 cm	Sc, M, C, S, P, Fp, I	F, Fp	Sc, C, I, P, F, S, M	Sc, I, P, F, S	Sc, C, I, P, F, S, M	Sc, C, I, P, F, S	
	6-9	13 cm	Fp, C, Sc, S, I	ok	-	Fp, C, Sc, I	Fp, C, Sc, S, I	Fp, C, Sc, S, I	
	9-0	12 cm	Sc, S, C, Fp, P, I, Fm	ok	-	S, I, Sc, C, P	Sc, S, C, Fp, P, I, Fm	Sc, S, C, Fp, P, I, Fm	

P porosidad
 I inclusiones de forma y orientación variada
 F falta de fusión
 M mordeduras

G grietas
 S sobre penetración
 Sc socavado
 Fp Falta de penetración

Fm Falta de material aporte
 C Cordón irregular

5.2.1 Inspección visual

- En las imágenes número 1, 2 y 3 se puede apreciar la preparación mecánica de las probetas con el diseño de junta adecuado según en WPS 009 y PQR P – 10656.
- El electrodo que se observa en la Fotografía número 4, es el metal de aporte del proceso GTAW con gas de protección de Argón y sus especificaciones indican que ⁴⁵:

Tabla 6: Especificaciones electrodo ER70S-6

Cuenta con altos niveles de desoxidantes de manganeso y silicio toleran superficies con escamación ligera hasta pesada.
El excelente mojado brinda una óptima apariencia del cordón
Recubrimiento de cobre para una larga vida de punta de contacto
Soporta perfectamente transferencia de corto circuito, globular, rocío axial y rocío por pulsos
MicroGuard® Ultra proporciona alimentación y estabilidad de arco superiores

Fuente: Autor

⁴⁵ Lincolnelectric, L-S6™ Acero Dulce, Recubrimiento de Cobre, AWS ER70S-6. [en línea] 2010, [revisado el 12 de septiembre del 2018] disponible en Internet: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-L-S-LS6/L-S6_ES-MX.pdf

- En la Fotografía 7 y 8 se encuentra la probeta en posición para soldar
- En la Fotografía 11 y 12 se verifica la posición que se necesita del soldador, se verifica que sea la adecuada y se inspecciona cada pase de soldadura
- En la Fotografía 15 y 16 se inspecciona la sobre penetración de la probeta número 1 en la sección 3-6 y socavado de 1.3mm de profundidad estas discontinuidades fueron generadas en base al manual de fallas inducidas
- En la Fotografía 17 y 18 se evaluaron con la galga BRIDGE CAM los socavados que se encuentran a 2mm de profundidad y poros con 4mm.
- En la probeta número 3 de la Fotografía 19 se observa falta del cordón de penetración a causa de que se encontraron poros, socavados e inclusiones en el cordón de relleno, y se procedió a suspender la soldadura.
- Se observa en la Fotografía número 20 que el sobre espesor aparente ocurre por una baja velocidad de avance en la aplicación soldadura.
- En la Fotografía de la probeta número 4 se evalúa la porosidad que se encuentra según lo indica la galga BRIDGE CAM en 4mm de profundidad
- En la probeta número 1 de la Fotografía 22 se determina un cambio en el ancho del cordón y un exceso de sobre espesor en la soldadura a tope generado por una técnica manual de inducción de discontinuidad del soldador y la disminución de voltaje en el equipo.
- En la Fotografía 23 y 24 se verifica el diámetro que se encuentra en el WPS 009

5.2.2 líquidos penetrantes y partículas magnéticas

- En las imágenes 26,27,28,29,39,40,41 y 42 se inspecciono la probeta numero 3

En la sección 0-3 la cual cuenta con una longitud en cm de 9.5cm

Tabla 7: Sección 0-3 probeta numero 3

Periodo	Estado del cordón
0 – 2 cm	Socavados laterales
2 – 4 cm	Socavado lado opuesto de la marcación en sentido horario de la probeta
4 – 5 cm	Socavado lateral lado opuesto de la marcación en sentido horario de la probeta
5 – 6 cm	ok
6 – 7 cm	Cambio irregular superficie, mordedura e inicio de socavado, cambio de espesor en la soldadura
7 – 9.5 cm	Socavado, falta de penetración y de material de aporte

Fuente: Autor

Sección 3-6 la cual se encuentra con una longitud de 9cm

Tabla 8: Sección 3-6 probeta número 3

Periodo	Estado del cordón
0 – 1 cm	Cambio espesor en la soldadura, pequeño socavado en la parte opuesta a la marca
1 – 3 cm	Falta de fusión
3 – 4 cm	Porosidad parte superior soldadura y falta de fusión
4 – 5 cm	ok
5 – 7 cm	Falta de fusión, porosidad, sobre espesor en la soldadura
7 – 8 cm	Porosidad tubular visible en la parte central de la soldadura
8 – 9 cm	Socavado y exceso de material de aporte

Fuente: Autor

Sección 6-9 la cual se encuentra con una longitud de 9cm

Tabla 9: Sección 6-9 probeta número 3

Periodo	Estado del cordón
0 – 1 cm	Cambio abrupto y falta del material de aporte, soldadura incompleta
1 – 3 cm	Socavado en la parte opuesta de la marcación en sentido horario de la probeta
3 – 7cm	Presencia de inclusiones, socavado
6 – 7 cm	Inicia cambio del espesor de la soldadura (falta de material de aporte) Porosidad e inclusiones, socavado lado opuesto de la marcación en sentido horario de la probeta
7 – 9 cm	Falta de material de aporte y de fusión del material, mordedura, socavado

Fuente: Autor

Sección 9-0 la cual se encuentra con una longitud de 9cm

Tabla 10: Sección 9-0 probeta número 3

Periodo	Estado del cordón
0 – 4 cm	Falta de material de aporte, soldadura, falta de fusión en el material por el lado cóncavo opuesto de la soldadura, socavado
1 – 4 cm	Presencia de inclusiones y mordedura
4 – 5 cm	Cambio de espesor en la soldadura, mordedura y porosidad
5 – 9 cm	Irregularidad de morfología en la soldadura
5 – 7 cm	socavados
7 – 8 cm	Porosidad tubular en la soldadura, irregularidad y falta de material de aporte
8 – 9 cm	Cambio de espesor en la soldadura

Fuente: Autor

- En las imágenes 30,31,32,33,44,45,46 y 47 se inspecciono la probeta número 4

En la sección 0-3 la cual cuenta una longitud en cm de 9cm

Tabla 11: Sección 0-3 probeta número 4

Periodo	Estado del cordón
1 – 2 cm	Socavados, presencia de inclusión
2 – 5 cm	Cambios de morfología y soldadura convexa (cordón irregular)
5 – 8 cm	Presencia de socavado
8 – 9 cm	Cambio irregular en el cordón de cóncavo a convexo

Fuente: Autor

Sección 3-6 la cual se encuentra con una longitud de 9.5cm

Tabla 12: Sección 3-6 probeta número 4

Periodo	Estado del cordón
0 – 2 cm	Socavado, exceso soldadura (sobre penetración), cambio cóncavo a convexo
2 – 5 cm	Sobre penetración e inclusiones
5 – 6 cm	ok
6 – 8 cm	Inclusiones metálicas
8 – 9 cm	Cambio espesor en la soldadura (Socavado)
9 – 9.5 cm	Inclusiones metálicas

Fuente: Autor

Sección 6-9 la cual se encuentra con una longitud de 8cm

Tabla 13: Sección 6-9 probeta número 4

Periodo	Estado del cordón
0 – 2 cm	Socavado irregular superficie soldadura y cambio de espesor
2 – 4 cm	ok
4 – 5 cm	Socavado y exceso de penetración, interrupción de soldadura
5 – 6 cm	Cambio brusco en el proceso de soldadura, socavado en extremos y en el centro del cordón
6 – 8 cm	Socavado a un lado y en la parte superior del cordón y en la altura de la soldadura

Fuente: Autor

Sección 9-0 la cual se encuentra con una longitud de 10cm

Tabla 14: Sección 9-0 probeta número 4

Periodo	Estado del cordón
0 – 4 cm	Socavado, exceso de penetración y del material de aporte
4 – 5cm	Cambio brusco en el aporte de la soldadura de convexo a cóncavo
5 – 8 cm	Socavados laterales, falta de penetración y presencia de inclusiones
8 – 10 cm	Porosidad agrupada, presencia de inclusiones, falta de material aporte e inclusiones metálicas

Fuente: Autor

- En las imágenes 34,35,36,37,49,50 y 51 se inspecciono la probeta número 5

En la sección 0-3 la cual cuenta una longitud en cm de 13.5cm

Tabla 15: Sección 0-3 probeta número 5

Periodo	Estado del cordón
0 – 1 cm	Socavado en los lados del cordón
2 – 3 cm	Mal direccionamiento en la soldadura, mordedura
3 – 5 cm	Socavado
5 – 7 cm	Cambio de espesor, interrupción y exceso en la soldadura, socavado en el centro del cordón, falta de penetración
7 – 9 cm	Socavado parte opuesta de la marcación en sentido horario de la probeta
9 – 11 cm	Socavado y falta de penetración
11 – 12 cm	Inclusiones de tungsteno y falta de penetración
12 – 13.5 cm	Cambio de espesor en la soldadura, cordón irregular

Fuente: Autor

Sección 3-6 la cual se encuentra con una longitud de 14.5cm

Tabla 16: Sección 3-6 probeta número 5

Periodo	Estado del cordón
0 – 3 cm	Socavado
3 – 4 cm	Irregularidad en el cordón de la soldadura e inclusiones metálicas
4 – 6 cm	Socavado en el lado de la marcación en sentido horario de la soldadura
6 – 7 cm	Mordedura y porosidad
7 – 8 cm	Porosidad y falta de fusión
8 – 10 cm	Irregularidad en la soldadura y exceso de material de aporte
10– 13 cm	Socavado
13 – 14.5 cm	Socavado e inclusiones metálicas

Fuente: Autor

Sección 6-9 la cual se encuentra con una longitud de 13cm

Tabla 17: Sección 6-9 probeta número 5

Periodo	Estado del cordón
0 – 5 cm	Falta de material de aporte, mordedura, socavado
5 – 6 cm	Cambio de morfología en la soldadura, inclusiones metálicas
6 – 8 cm	Exceso de penetración y fusión en el material de aporte
8 – 9 cm	Socavados e Inclusiones
9 – 12 cm	Socavado, cambio de la morfología en la soldadura
12 – 13 cm	ok

Fuente: Autor

Sección 9-0 la cual se encuentra con una longitud de 12cm

Tabla 18: Sección 9-0 probeta número 5

Periodo	Estado del cordón
0 – 1 cm	Socavado, exceso de fusión
1 – 3 cm	Socavado, parte opuesta de la marcación en sentido horario de la soldadura
3 – 4 cm	ok
5 – 7 cm	Porosidad e inclusiones metálicas
7 – 8 cm	Mordedura
8 – 12 cm	Exceso de material de aporte, socavado y falta de fusión

Fuente: Autor

5.2.3 Radiografía industrial

- En la Fotografía 54 se inspeccionó la probeta número 1 se observa sobre penetración, cordón irregular en la sección 3-6 de acuerdo al sentido horario
- En la Fotografía 56 se inspeccionó la probeta número 2 que se encuentra en optimo estado
- En la Fotografía 58 se inspeccionó la probeta número 3 se observa sobre penetración, cordón irregular, fusión incompleta y socavado en la sección 0-3 de acuerdo al sentido horario
- En la Fotografía 60 se inspeccionó la probeta número 4, que tiene 3 radiografías de importancia, se observa en la sección 0-3 demarcada como 4A hay presencia de Socavado, cordón irregular, inclusiones y Porosidad, en la sección 3-6 demarcada como 4B existe cordón irregular, porosidad individual, falta de penetración y socavado, en la sección 6-9 demarcada como 4C encontramos cordón irregular, Falta de material de aporte, inclusiones, porosidad y sobre penetración
- En la Fotografía 64 se inspeccionó la probeta número 5 se observa sobre penetración, cordón irregular, fusión incompleta, inclusiones de tungsteno, mordedura, porosidad agrupada e individual y socavado en la sección 0-3 de acuerdo al sentido horario

5.2.4 Ultrasonido convencional

- En la Fotografía 67,68 se observan las 5 probetas ya inspeccionadas por ultrasonido convencional
- En la Fotografía 69 observamos una discontinuidad con una longitud de 9cm a través de la soldadura
- En la Fotografía 70 se puede analizar que se encuentra en optimo estado para prestar servicio

- En la Fotografía 71 que corresponde a la probeta número 3 se observa que tiene una discontinuidad bastante grande en un tramo de 8 a 9cm
- En la Fotografía 72 de la probeta número 4 se encuentran 3 tramos de aproximadamente 6 a 8cm con discontinuidades a través de la soldadura
- En la Fotografía 73 que corresponde a la probeta número 5 se determina que tiene discontinuidades intermitentes a través de la soldadura de aproximadamente 7 a 8cm cada una
- A partir de la Fotografía 74 a la 79 se observan los resultados del ultrasonido donde se observan parámetros como espesor, recorrido del sonido (\searrow), profundidad (\downarrow), decibeles donde se ubica la compuerta, el porcentaje de ganancia y la distancia del palpador al borde de la probeta (\rightarrow) .

Tabla 19: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número uno – norma de aceptación para NDT

PROBETA	SECCIÓN	CRITERIOS DE ACEPTACION API 1104 CAPITULO 9 – NORMA DE ACEPTACION PARA NDT					
		INSPECCION VISUAL	LIQUIDOS PENETRANTES	PARTICULAS MAGNETICAS	RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	ULTRASONIDO CONVENCIONAL	CRITERIO
1	0-3	Cordón irregular, sobre penetración de 0.8 mm	ok	N/A	N/A	Ok	REPARAR
	3-6	socavado de 1.3mm	ok	N/A	Indicación RELEVANTE en el pase de raíz, en longitud continua de 12" de 2.4"	indicación volumétrica que excede 3mm	RECHAZADO, CAMBIAR
	6-9	Cordón irregular, sobre penetración de 1 mm	ok	N/A	N/A	Ok	REPARAR
	9-0	Cordón irregular, sobre penetración de 0.9 mm	ok	N/A	N/A	Ok	REPARAR

Fuente: Autor

Tabla 20: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número dos – norma de aceptación para NDT

PROBETA	SECCIÓN	CRITERIOS DE ACEPTACION API 1104 CAPITULO 9 – NORMA DE ACEPTACION PARA NDT					
		INSPECCION VISUAL	LIQUIDOS PENETRANTES	PARTICULAS MAGNETICAS	RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	ULTRASONIDO CONVENCIONAL	CRITERIO
2 ref.		OK	OK	OK	OK	OK	ACEPTADO

Fuente: Autor

Tabla 21: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número tres – norma de aceptación para NDT

PROBETA	SECCIÓN	CRITERIOS DE ACEPTACION API 1104 CAPITULO 9 – NORMA DE ACEPTACION PARA NDT					CRITERIO
		INSPECCION VISUAL	LIQUIDOS PENETRANTES	PARTICULAS MAGNETICAS	RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	ULTRASONIDO CONVENCIONAL	
3	0-3	Socavado por debajo del 12,5% del espesor de la pared del tubo	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.3 sección (c)	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la norma sección (c)	INDICACION RELEVANTE Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura	múltiples indicaciones en el mismo lugar circunferencial con una altura vertical resumen (a través de la pared) dimensión superior a un cuarto del espesor de la pared según numeral 9.6.2.1 sección (c)	RECHAZADO CAMBIAR
	3-6	Cordón irregular, sobre penetración de 0.8 mm	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.3 sección (c)	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.3, según numeral 9.4.2	INDICACION DE POROSIDAD RELEVANTE, el tamaño de un poro individual excede 1/8 pulg. (3 mm) según el numeral 9.3.9.2 sección (a) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR
	6-9	Socavado por debajo del 12,5% del espesor de la pared del tubo	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.3 sección (c)	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la sección (c)	INDICACION DE POROSIDAD CLUSTER RELEVANTE, el diámetro de la agrupación excede 1/2 in según el numeral 9.3.9.3 sección (a) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR
	9-0	Socavado por debajo del 12,5% del espesor de la pared del tubo	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.2 sección (c)	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la sección (c)	INDICACION DE POROSIDAD Hollow Bead RELEVANTE, la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.3.9.4 sección (d) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR

Fuente: Autor

Tabla 22: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número cuatro – norma de aceptación para NDT

PROBETA	SECCIÓN	CRITERIOS DE ACEPTACION API 1104 CAPITULO 9 – NORMA DE ACEPTACION PARA NDT					
		INSPECCION VISUAL	LIQUIDOS PENETRANTES	PARTICULAS MAGNETICAS	RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	ULTRASONIDO CONVENCIONAL	CRITERIO
4	0-3 (A)	Discontinuidad 12.5% del espesor de pared de la tubería, que sea más pequeña tiene un de Socavado de 1.4mm numeral 9.7.2 de la norma tabla 4	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.5.2 sección (c) de la norma	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la sección (c)	INDICACION DE POROSIDAD RELEVANTE, el tamaño de un poro individual excede 1/8 pulg. (3 mm) según el numeral 9.3.9.2 sección (a) de la norma	la longitud total de indicaciones sobre el nivel de evaluación excede de 2 pulg. (50 mm) Indicaciones VI se considerarán defectos cuando la dimensión máxima de volumétricos individuales indicaciones excede 1/8 pulg. (3 mm). según numeral 9.6.2.6	RECHAZADO, CAMBIAR
	3-6 (B)	Inclusiones que exceden el 8% del total	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.5.2 sección (c) de la norma	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la sección (c)	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.3.9.4 sección (d) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR
	6-9 (C)	Discontinuidad 12.5% del espesor de pared de la tubería, que sea más pequeña tiene un de Socavado de 1.4mm numeral 9.7.2 de la norma tabla 4	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.2 sección (c)	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la sección (c)	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.3.9.4 sección (d) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR
	9-0	Porosidad agrupada	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.5.2 sección (c) de la norma	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.3, según numeral 9.4.2	INDICACION DE POROSIDAD RELEVANTE, el tamaño de un poro individual excede 1/8 pulg. (3 mm) según el numeral 9.3.9.2 sección (a) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR

Fuente: Autor

Tabla 23: Criterios de aceptación api 1104 capitulo 9 para la probeta número cinco – norma de aceptación para NDT

PROBETA	SECCIÓN	CRITERIOS DE ACEPTACION API 1104 CAPITULO 9 – NORMA DE ACEPTACION PARA NDT					
		INSPECCION VISUAL	LIQUIDOS PENETRANTES	PARTICULAS MAGNETICAS	RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	ULTRASONIDO CONVENCIONAL	CRITERIO
5	0-3	Discontinuidad 12.5% del espesor de pared de la tubería, que sea más pequeña tiene un de Socavado de 1.5mm numeral 9.7.2 de la norma tabla 4	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.5.2 sección (c) de la norma	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la sección (c)	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.3.9.4 sección (d) de la norma	múltiples indicaciones en el mismo lugar circunferencial con una altura vertical resumen (a través de la pared) dimensión superior a un cuarto del espesor de la pared según numeral 9.6.2.1 sección (c) la longitud total de las indicaciones sobre el nivel de evaluación supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según numeral 9.6.2.8 sección (b)	RECHAZADO, CAMBIAR
	3-6	Discontinuidad 12.5% del espesor de pared de la tubería, que sea más pequeña tiene un de Socavado de 1.1mm numeral 9.7.2 de la norma tabla 4	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.2 sección (c)	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.3, según numeral 9.4.2	INDICACION DE POROSIDAD RELEVANTE, el tamaño de un poro individual excede 1/8 pulg. (3 mm) según el numeral 9.3.9.2 sección (a) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR
	6-9	Discontinuidad 12.5% del espesor de pared de la tubería, que sea más pequeña tiene un de Socavado de 1.1mm numeral 9.7.2 de la norma tabla 4	Indicaciones redondeadas se evaluarán de acuerdo con los criterios del 9.3.9.2 y 9.3.9.2 sección (c)	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la sección (c)	INDICACION DE POROSIDAD RELEVANTE, el tamaño de un poro individual excede 1/8 pulg. (3 mm) según el numeral 9.3.9.2 sección (a) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR
	9-0	Socavado 1.3mm, porosidad agrupada e inclusiones de tungsteno	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.5.2 sección (c) de la norma	Acumulación de imperfecciones por encima del 8% de la longitud de la soldadura según numeral 9.4.2 de la sección (c)	la longitud total de todas las indicaciones de HB supera el 8% de la longitud de la soldadura. Según el numeral 9.3.9.4 sección (d) de la norma		RECHAZADO, CAMBIAR

Fuente: Autor

6. CONCLUSIONES

- Se evaluó mediante métodos experimentales que las probetas de acero al carbono ASTM A 53 gr B que se le realizaron minúsculos cambios a las variables esenciales, no esenciales y suplementarias con respecto al WPS de referencia, presentan afectaciones considerables en los resultados esperados en la soldadura.
- Se demostró el comportamiento de la soldabilidad en los procesos de soldadura GTAW y GMAW mediante modificaciones controladas a las variables esenciales, no esenciales y suplementarias.
- Se propiciaron condiciones irregulares de trabajo comunes en la industria con el fin de generar defectos que se comparan con la probeta de referencia (cumple con el WPS) vs las probetas pruebas (cambios en el WPS).
- Se concluye que se debe seguir cuidadosamente las especificaciones del WPS “Welding procedure specification” y tener en cuenta las discontinuidades que se presentan en la aplicación de la soldadura en las líneas de tubería que se construyen en la planta de tratamiento de agua - Termosuría – Ecopetrol.
- Se decide en base a los resultados hacer las correcciones necesarias para la ejecución de soldaduras de buena calidad.
- El estudio realizado evidencia que al generar los defectos se puede comprobar que los malos hábitos por parte de los soldadores y no tener en cuenta puntualmente las características plasmadas en el WPS producen discontinuidades en la soldadura perjudiciales para la integridad de las estructuras metalmecánicas.
- En conocimiento a los resultados de la investigación se creó conciencia en los operadores de soldadura con el fin de mejorar la producción sin retrocesos en el proceso constructivo y con estándares de alta calidad en las juntas soldadas.
- Se identificó mediante ensayos no destructivos como: inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía industrial, ultrasonido

convencional; que los defectos generados (Porosidad, falta de fusión, inclusiones, sobre penetración, socavados, mordeduras, falta de penetración, cordón irregular) debido a la aplicación de los procesos de soldadura GTAW y GMAW con cambios controlados en las variables esenciales, no esenciales y suplementarias.

- Se evidencia como afectan las piezas metálicas en morfología, defectología e integridad con la finalidad de que no se presenten en el proceso de construcción de la planta de tratamiento de agua Termosuría – Ecopetrol.
- En el análisis de control calidad se evaluaron mediante los criterios de aceptación referenciados en el API 1104 capítulo 9, donde se evidencia que las discontinuidades encontradas en las probetas de prueba son rechazables debido a que no son deseables en los resultados de las soldaduras ejecutadas en campo.
- La probabilidad de detección es alta debido que los ensayos de inspección son requisitos de gran importancia en el aseguramiento de la calidad en cualquier proyecto metalmecánico, por ende, si se presenta alguna anomalía se puede corregir a tiempo sin comprometer la integridad de la construcción metálica.
- El soldador u operario de soldadura debe estar calificado de acuerdo a un WPQ (Welding performance qualification)

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda por parte de los operadores de soldadura seguir detalladamente las especificaciones que están establecidas en el WPS “Welding procedure specification” para obtener buenos resultados en las soldaduras ejecutadas.
- Se debe ejecutar ensayos no destructivos relacionados en el plan de inspección y ensayo con el fin de dar aseguramiento de la calidad a las juntas soldadas.
- Si se detecta algún defecto de soldadura durante la construcción se debe tomar las acciones de corrección correspondiente con el fin de no comprometer la integridad de las estructuras metálicas.
- Se debe tener en cuenta las condiciones de trabajo sean las mejores para el desarrollo de las mismas como, por ejemplo: condiciones de salud de operador, lugar de trabajo seguro, buen estado de los equipos, debido a que son fundamentales para la ejecución de los proyectos con buenos estándares de calidad.

9. BIBLIOGRAFÍA

ACOSEND, «Congreso de Soldadura y Ensayos no Destructivos,» vol. Vol 1, 2013.

AEND. Ultrasonido. 1 ed. España. Fundación confemetal. 2002. 205 p. ISBN. 84.96169.8

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR), Ensayos no Destructivos. Inspección Visual. Principios Generales UNE-EN 13018, 2016.

ASM. Metal Handbook, Volumen 6, 9na Edición pp. 79,81,126

ASME T-670.American society mechanical engineers.USA.secc V. 2007

ASME E-94 .American society mechanical engineers.USA.secc V. 2007

ASME QW-463.1. American society mechanical engineers.USA.secc IX. 2007

ASM. Metal Handbook, Volumen 6, 9na Edición pp. 79,81,126

ASME QW- 461.3. American society mechanical engineers.USA.secc IX. 2007

ASTM A370. Standard Methods And Definitions For Mechanical Testing Of Steel Products. 1967 pp 327.

API 1104. Standard for Welding Pipelines And Related Facilities. 2014.Twenty – Edición

AWS C5.5 & AMERICAN NATIONAL STANDARD. Recommend practices for gas tungsten arc welding. EE.UU: Editorial AWS Welding Research, 2003. pp. 9-18

AWS C5.5 & AMERICAN NATIONAL STANDARD. Recommend practices for gas tungsten arc welding. EE.UU: Editorial AWS Welding Research, 2014

AWS D1.1& ANSI. Structural Welding Code-Steel. USA: Editorial AWS Welding Research, 2016.

BLITZ, J. SIMPSON, G. Ultrasonic methods of non-destructive testing. 2 ed. U.S.A. Chapman & Hall.1996. 261 p. ISBN 0 412 60470 1

GUIDEBOOK FOR THE FABRICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING (NDT) Test Specimens, TRAINING COURSE SERIES No. 13, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2001

HERRY HORWITZ, P.E. "Soldadura, Aplicación y práctica", Representaciones y servicios de Ingeniería, México, 2001

HORWITZ H. Enciclopedia de la soldadura, Tomo I. Ediciones PC pp. 49-50

LINCOLN ELECTRIC. Procedure Handbook Of Arc Welding. Edición Especial pp. 4.1-2, 13.3-3

LIPPOLD John &.KOTECKI Damian. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel. EE.UU: John Wiley & Sons Inc, 2005. pp. 8-19

MANUAL TECNICO DE SOLDADURA. - AMERICAN WELDING SOCIETY-Prentice Hall.-1994

MANUEL REINA GOMEZ.Soldadura de los aceros aplicaciones, Vol. 1, 4ta edición 2003 pág. 31,32

MILLER ELECTRIC. Gas Metal Arc Welding, 1era Edición pp. 3, 8.

MILLER ELECTRIC. Gas Metal Arc Welding, Primera Edición 215994 2018, pp. 5

R. ROWEL, L. JEFFUS, "Manual de soldadura", Ed. Paraninfo, España, pp. 54-56, 2008.

Sociedad de Soldadura a Gas y Presión del Japón, (1996b), "Manual de Soldadura a Gas y Presión", Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, Marzo, pp. 15. <https://www.seas.es/blog/variados/defectos-internos-en-soldadura-parte-1/>

TESIS ARMAS – PEÑAFIEL. Influencia del gas protector en el proceso de soldadura GMAW de aceros estructurales AISI 1008 y AISI 1045. Riobamba: ESPOCH, 2003. pp. 103-111

THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Third Edition: Volume 10, Overview, New York, 2012..

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Rules For Construction of Pressure Vessels, International Code, ASME Boiler and Pressure Vessel Committee Subcommittee on Pressure Vessels BPVC-VIII-1, New York, 2014.

THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 10, Overview, New York, 2012.

THE AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERS, Estándar E1316 Terminología para exámenes no destructivos, 2013.

THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 10, Overview, New York, 2012.

THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, RECOMMENDED PRACTICE No. SNT-TC-1A, 2016 Edition, and ASNT Standard Topical Outlines for Qualification of Nondestructive Testing Personnel (ANSI/ASNT CP-105-2016), 2016.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Estándar de Aceptación para Inspección visual. ASME BPVC-V, 2017.

THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, ASNT Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel (ANSI/ASNT

CP-189-2016) & ASNT Std. Topical Outlines for Qualification of NDT Personnel (ANSI/ASNT CP-105-2016), 2016.

THE AMERICAN SOCIETY FOR METALLURGICAL ENGINEERS, Método de Ensayo para el Examen por Líquidos Penetrantes Visibles Usando Procesos Removibles con Solvente ASME E 165, 2013.

THE AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Cambio de Radiografía Por Ultrasonido-API STANDARD 650, apéndice U, 2013.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Métodos de Examen Ultrasónico para Materiales y Fabricación, ASME SECCIÓN V, ARTICULO 5 MÉTODOS DE EXAMEN ULTRASÓNICO PARA MATERIALES Y FABRICACIÓN T-510 ALCANCE, 2010.

Universidad de los Andes Colombia, «Laboratorio de Ensayos no Destructivos,» [En línea]. Available: <https://mecanica.uniandes.edu.co/index.php/menulaboratorios>. [Último acceso: 10 de septiembre 2018].

VALENCIA. J. Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio

Welding metallurgy. 4th ED. Miami American Welding Society, 2007

Welding, Brazing and Soldering”, Vol. 16, Matching, American Society for metals, 1989, Ohio, USA.