



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
PARA LA DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA ADECUADA (GTAW O
SMAW) PARA LA UNIÓN DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 CÉDULA 40 DE
2" DE DIÁMETRO, BAJO CONDICIONES DE LA NORMA AWS D1.6**

Daniel Alejandro Cortez de León
Asesorado por MSc. Ing. Rudy Carías

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE ENSAYOS NO
DESTRUCTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA
ADECUADA (GTAW O SMAW) PARA LA UNIÓN DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE
AISI 304 CÉDULA 40 DE 2" DE DIÁMETRO, BAJO CONDICIONES DE LA NORMA AWS D1.6**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DANIEL ALEJANDRO CORTEZ DE LEÓN
ASESORADO POR EL MSC. ING. RUDY CARÍAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Álvaro Antonio Ávila Pinzón
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Coronado Noj
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE ENSAYOS NO
DESTRUCTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA
ADECUADA (GTAW O SMAW) PARA LA UNIÓN DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE
AISI 304 CÉDULA 40 DE 2" DE DIÁMETRO, BAJO CONDICIONES DE LA NORMA AWS D1.6**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 20 de agosto de 2018.

Daniel Alejandro Cortez de León

Guatemala, 20 de agosto de 2018.

Director
Julio César Campos Paiz
Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante **Daniel Alejandro Cortez de León** con carné número **201222602**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a todos"

Maestro Ing. Rudy René Carías
Asesor(a)

Rudy René Carías
Ingeniero Mecánico
Colegiado 11125

Doctora Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola
Coordinadora de Área
Gestión y Servicios

ALBA MARITZA GUERRERO SPINOLA
INGENIERA INDUSTRIAL
COLEGIADA No. 4611

Maestro Ing. Edgar Darío Álvarez Coto
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc: archivo/LZ.LA.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.284.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación de la Coordinadora del Área de Gestión y Servicios de la Escuela de Estudios de Postgrado, modalidad Pregrado-Postgrado de la Maestría de Ingeniería en Mantenimiento, del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA ADECUADA (GTAW O SMAW) PARA LA UNIÓN DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 CÉDULA 40 DE 2" DE DIÁMETRO BAJO CONDICIONES DE LA NORMA AWS D1.6**" del estudiante **Daniel Alejandro Cortez de León**, CUI **2171138420101**, Registro Académico No. **201222602** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, octubre de 2018

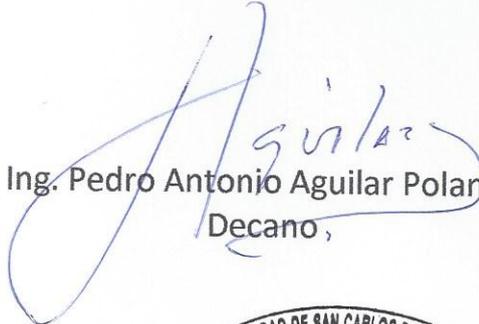
/aej



DTG. 412.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA ADECUADA (GTAW O SMAW) PARA LA UNIÓN DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 CÉDULA 40 DE 2" DE DIAMETRO, BAJO CONDICIONES DE LA NORMA AWS D1.6,** presentado por el estudiante universitario: **Daniel Alejandro Cortez de León,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano,

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su amor y bendiciones durante toda mi vida.
Mis padres	Byron Haroldo Cortez García y María del Carmen de León Chávez, por su apoyo incondicional durante toda mi vida.
Mis hermanos	Pablo David Cortez de León y Lucía Andrea Cortez de León, por el apoyo y solidaridad durante mi etapa universitaria.
Mis abuelas	Josefina Chávez y Manuela García por el cariño y apoyo en el transcurso de mi carrera.
Mis tíos	Guillermo de León, Magda de León, Gerardo de León, Mario de León, Brendy de León por ser importantes influencias en mi carrera.
Mis compañeros	Por el apoyo brindado.
Mi abuelo	Oswaldo de León, por ser una inspiración en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por enseñarme la importancia de la responsabilidad, trabajo duro y dedicación.
Facultad de Ingeniería	Por desarrollar mis habilidades como profesional de la ingeniería mecánica.
Mis catedráticos	Por compartir sus conocimientos y experiencias.
Mis amigos de la Facultad	Por el apoyo mutuo en los diferentes cursos de la carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
2.1. Descripción del problema	5
2.2. Planteamiento de las preguntas de investigación	6
2.3. Delimitación de la investigación.....	7
3. JUSTIFICACIÓN.....	9
4. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	11
5. MARCO TEÓRICO	13
5.1. Acero inoxidable	13
5.1.1. Definición	13
5.1.2. División de los aceros inoxidables.....	13
5.1.2.1. Austeníticos (serie 200 y 300).....	13
5.1.2.2. Ferríticos (serie 400)	14
5.1.2.3. Martensíticos (serie 400 y 500)	14
5.1.2.4. Endurecidos por precipitación (PH)	14

5.2.	Tuberías.....	16
5.2.1.	Tipos de tuberías.....	16
5.2.2.	Usos de las tuberías.....	17
5.3.	Soldadura.....	18
5.4.	Soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW).....	18
5.4.1.	Ventajas y desventajas del proceso SMAW.....	19
5.4.2.	Equipo.....	19
5.4.3.	Polaridades.....	21
5.4.4.	Factores que influyen en la calidad de la soldadura.....	22
5.4.5.	Clasificación de los electrodos.....	23
5.5.	Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW).....	24
5.5.1.	Características de la soldadura.....	26
5.5.2.	Contaminación de la soldadura.....	27
5.5.3.	Posiciones de soldadura de tubos.....	28
5.5.4.	Varillas de aporte.....	30
5.5.5.	Electrodo de tungsteno.....	31
5.5.6.	Afilado del electrodo de tungsteno.....	31
5.5.7.	Ventajas del proceso GTAW.....	32
5.5.8.	Desventajas del proceso GTAW.....	32
5.6.	Ensayos no destructivos.....	32
5.6.1.	Tipos de ensayos no destructivos.....	33
5.6.2.	Clasificación de los END.....	33
5.7.	Ensayo de ultrasonidos.....	34
5.7.1.	Ventajas.....	35
5.7.2.	Desventajas.....	36
5.7.3.	Clasificación de las técnicas por ultrasonidos.....	36

5.7.4.	Aplicaciones.....	37
5.7.5.	Discontinuidades detectadas por los ultrasonidos ..	37
5.7.6.	Tipos de discontinuidades internas	38
5.8.	Rayos X.....	44
5.8.1.	Limitaciones de la radiografía industrial	46
5.9.	Análisis metalográfico	47
5.9.1.	Tipos de metalografías	48
6.	PROPUESTA DEL ÍNDICE DE CONTENIDOS	51
7.	METODOLOGÍA	55
7.1.	Diseño	55
7.2.	Tipo de estudio	55
7.3.	Alcance	56
7.4.	Variables independientes.....	57
7.5.	Variables dependientes	57
7.6.	Indicadores.....	58
7.7.	Fases	58
7.8.	Resultados esperados	60
8.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	61
9.	CRONOGRAMA.....	63
10.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	65
10.1.	Factibilidad operativa	65
10.2.	Factibilidad económica	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69

APÉNDICE 73
 Apéndice 1. Matriz de coherencia 73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución.....	12
2.	Tuberías de acero inoxidable cédula 40.....	18
3.	Máquina para proceso SMAW.....	20
4.	Electrodos revestidos.....	20
5.	Polaridades del proceso SMAW	21
6.	Equipo para soldadura GTAW.....	25
7.	Proceso de soldadura GTAW	25
8.	Distribución de calor en el electrodo de tungsteno.....	26
9.	Posiciones de soldadura en tubos	29
10.	Filo del tungsteno.....	31
11.	Equipo de inspección por ultrasonidos	35
12.	Inclusiones de escoria	39
13.	Fusión incompleta.....	40
14.	Grietas longitudinales.....	42
15.	Grietas transversales	42
16.	Tipo de grietas características en procesos de soldadura	43
17.	Porosidad con distribución uniforme a lo largo de la soldadura	44
18.	Equipo para inspección de rayos X.....	46
19.	Granos metalográficos.....	47
20.	Cronograma de actividades	63

TABLAS

I.	Clasificación de los aceros inoxidables.....	14
II.	Relación entre varilla de aporte y acero inoxidable a soldar	30
III.	Factibilidad económica	67

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
END	Ensayos No Destructivos
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
RX	Rayos X
SMAW	Shield Metal Arc Welding
UT	Ultrasonidos

GLOSARIO

- ASTM** Es la sociedad americana de pruebas y materiales y es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.
- Austenita** Es también conocida como acero gamma (γ), es una forma de ordenamiento específica de los átomos de hierro y carbono. Esta es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900 °C a 1400 °C. Está formado por una disolución sólida del carbono en hierro, lo que supone un porcentaje máximo de C del 2,11 %. La austenita es dúctil, blanda y tenaz.
- AWS** La *American Welding Society* (AWS) fue fundada en 1919 como una organización sin fines de lucro con una misión global de avanzar en la ciencia, tecnología y aplicación de soldadura y procesos de unión y corte aliados, incluyendo soldadura fuerte, soldadura y pulverización térmica. La organización es quizás mejor conocida por su código y procedimientos de certificación, que proporcionan estándares de la industria para la soldadura y unión de metales, plásticos y otros materiales.

Electrodo

Es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, en su extremo se genera el arco eléctrico. En algunos casos, también sirve como material fundente. El electrodo o varilla metálica suele ir recubierta por una combinación de materiales diferentes según el empleo de la misma. Las funciones de los recubrimientos pueden ser: eléctrica para conseguir una buena ionización, física para facilitar una buena formación del cordón de soldadura y metalúrgica para conseguir propiedades contra la oxidación y otras características.

END

Son cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

GTAW

Del inglés *Gas Tungsten Arc Welding*, se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente de tungsteno, aleado a veces con torio o circonio en porcentajes no superiores a un 2 %.

Pasivación

Es la formación de una película relativamente inerte sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos. Aunque la reacción entre el metal y el agente externo sea termodinámicamente factible a nivel macroscópico, la capa o película pasavante no permite que estos puedan interactuar, de tal manera que la reacción química o electroquímica se ve reducida o completamente impedida.

Rayos X

Una radiación electromagnética, invisible para el ojo humano, capaz de atravesar cuerpos opacos y de imprimir las películas fotográficas. Los actuales sistemas digitales permiten la obtención y visualización de la imagen radiográfica directamente en una computadora (ordenador) sin necesidad de imprimirla. La longitud de onda está entre 10 a 0,01 nanómetros, correspondiendo a frecuencias en el rango de 30 a 30000 PHz.

SMAW

Método en el cual el calor de soldadura es generado por un arco eléctrico entre la pieza de trabajo (metal base) y un electrodo metálico consumible (metal de aporte) recubierto con materiales químicos en una composición adecuada (fundente).

OBJETIVOS

General

Establecer cuáles ensayos no destructivos son adecuados para la selección del proceso de soldadura (SMAW o GTAW) apropiado para la unión de tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro.

Específicos

1. Identificar el proceso de soldadura que produce menores defectos según el análisis de resultados obtenido a partir de la aplicación de las técnicas de ensayos no destructivos.
2. Determinar el proceso de soldadura que conlleva mayores costos para su fabricación en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro.
3. Describir cuáles son los resultados de fabricar una soldadura con electrodo o varilla de aporte inadecuado en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se emplean diferentes procesos para la realización de uniones soldadas. La creciente participación del sector industrial en el país ha incrementado la diversidad en los procesos de soldadura, aumentando con esto la posibilidad de seleccionar un proceso de soldadura incorrecto. La implementación de técnicas para la evaluación de uniones soldadas ha surgido como una necesidad a fin de aumentar la vida útil en elementos tales como tuberías. Las técnicas de ensayos no destructivos han facilitado la posibilidad de seleccionar el proceso de soldadura adecuado y obtener con esto mejor calidad en las soldaduras realizadas. Tal evaluación permite la determinación de fallas tanto internas como externas del cordón de soldadura.

La incorrecta selección de un proceso de soldadura puede contribuir a la aparición de fallas, las cuales pueden debilitar el material, comprometiendo su integridad física y resistencia mecánica. Estas fallas pueden ser ocasionadas por el calor generado en cada proceso o por la mala elección del material de aporte. El personal técnico nuevo en el campo de las uniones soldadas es el más propenso a cometer errores, principalmente sucede al no tener en cuenta que la calidad de una buena unión soldada influye en el tiempo de vida y la confiabilidad de los elementos que se unirán.

Los ensayos no destructivos son técnicas eficaces para determinar la homogeneidad y continuidad en las soldaduras realizadas, determinando así las posibles fallas o discontinuidades en los cordones de soldadura. Al utilizar específicamente los ensayos no destructivos de ultrasonidos, rayos x y el análisis metalográfico, se pueden visualizar las diferentes fallas ocurridas en

cada proceso de soldadura, por lo tanto, se puede determinar el proceso de soldadura adecuado y el material de aporte ideal para la fabricación de soldaduras en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro.

La información recopilada servirá como base para el desarrollo de la investigación. El análisis de resultados obtenidos a partir de la aplicación de ensayos no destructivos determinará el proceso de soldadura y el material de aporte adecuado para realizar soldaduras en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40. Se espera que, al finalizar la investigación, personas tales como técnicos y supervisores en el campo de la soldadura o público en general, tengan acceso a información relacionada sobre las técnicas de ensayos no destructivos como método para la determinación del proceso de soldadura y material de aporte adecuado para la unión soldada de tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro. Esto ayudará a la industria para la correcta supervisión en la ejecución de proyectos de instalaciones mecánicas. La investigación es factible, ya que se tienen los conocimientos del asesor para la aplicación de ensayos no destructivos y se cuenta con el asesoramiento de una empresa dedicada a la fabricación de uniones soldadas en tuberías de acero inoxidable, contando con todo el equipo necesario para el desarrollo de la investigación.

La investigación está contemplada en los siguientes capítulos:

El capítulo uno recopila la información necesaria para comprender y analizar el problema propuesto. Se definirán temas tales como ensayos no destructivos, tipos de ensayos no destructivos, aceros inoxidables, tipos de aceros inoxidables, soldaduras, tipos de soldaduras, designación de electrodos, tipos de tuberías.

El capítulo dos describe la metodología adecuada para la solución del problema, así como el tipo de investigación que se realizará. El cronograma se diseñará como método para la calendarización de actividades correspondientes al desarrollo de la investigación. Los alcances definirán los límites de la investigación. Las necesidades definirán los recursos económicos, materiales, equipo y capital humano que se utilizará para el desarrollo de la investigación.

El capítulo tres recopila y analiza los resultados conseguidos tras la aplicación de los ensayos no destructivos. Los ensayos no destructivos revelarán fallas y discontinuidades que se tabularán con la finalidad de realizar un análisis de resultados, observando así el efecto de cada proceso de soldadura en el cordón realizado.

El capítulo cuatro desarrolla la propuesta para la solución al problema planteado. El análisis de resultado definirá el material de aporte y el proceso de soldadura adecuado para la unión de tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40, desarrollando las competencias para la evaluación de soldaduras por medio de la aplicación de ensayos no destructivos.

1. ANTECEDENTES

Un proceso inadecuado de soldadura en tuberías de acero inoxidable repercute en fallas que pueden afectar tanto el material base como el cordón de soldadura realizado. Los ensayos no destructivos de ultrasonidos, rayos x y análisis metalográfico permiten obtener información de la calidad de soldadura en cada proceso realizado.

Otro elemento importante a contemplar en los ensayos no destructivos es el factor humano, debido a que los inspectores deben estar capacitados y calificados, teniendo en cuenta la experiencia que permita asegurar que sus resultados sean lo más confiable posible. (González, 1995).

Los ensayos no destructivos son herramientas utilizadas en los diferentes sistemas de control de la calidad para la elaboración de productos terminados, son también métodos para la detección de discontinuidades, defectos y fallas en los diferentes materiales y elementos de maquinaria. (Soria, 2004). Como lo explica Soria, los ensayos no destructivos se utilizan como método para la detección de fallas o discontinuidades prematuras, permitiendo con esto alargar la vida útil de una instalación o máquinas, las cuales pueden ser reparadas antes que ocurra un fallo total e irreparable.

La radiografía industrial es un método excelente para la inspección, ya que provee una imagen visual del interior de la pieza, permitiendo establecer la ubicación y forma de las discontinuidades presentes. (Brito, 2004). Brito señala que la radiografía industrial permite obtener discontinuidades y fallas presentes en una pieza. Según la experiencia del investigador, la radiografía industrial es

efectiva en ciertos espesores o chapas de pieza. El manejo y almacenamiento adecuado de los electrodos son factores que contribuyen a una alta calidad de las soldaduras en acero inoxidable, se debe considerar también las correctas técnicas de encendido y apagado de arco junto con una adecuada intensidad de corriente adecuada. (Alvarado, 2006). Alvarado se refiere a que los electrodos consumibles deben permanecer en un recinto libre de humedad y a una temperatura adecuada para un correcto inicio de arco.

El proceso de soldadura GTAW sin empleo de material de aporte logra alcanzar y muchas veces superar las características de las uniones soldadas con material de aporte, por lo que el empleo de este proceso sin material de aporte es lucrativo y productivo, ya que abarata costos al no tener que aplicar material de aporte y aumenta la velocidad de producción. (Pajuelo, 2009). Como lo explica Pajuelo, en el proceso GTAW se obtienen menores costos por la fabricación de uniones soldadas, esto debido a que no se utiliza material de aporte para la unión de dos elementos.

El acero inoxidable austenítico AISI 304 desarrolla y conserva algunas microestructuras resultantes en la zona de fusión, dependiendo del material de aporte elegido y de la tasa de enfriamiento empleada. Las propiedades mecánicas de las soldaduras en aceros inoxidables mejoran con porcentajes bajos de ferrita. (Villavicencio, 2010). En los metales de aporte con bajo contenido de carbono se disminuye la posibilidad de precipitación de carburos y se incrementa la resistencia a la corrosión intergranular sin la aplicación de estabilizadores tales como columbio y titanio. (Ibarra, 2010).

Se determinó que el acero inoxidable austenítico AISI 304 presenta un elevado grado de soldabilidad en el proceso SMAW. El electrodo AISI 308L, teniendo mejor afinidad con el material base, alcanza mejores propiedades de

soldabilidad. La máxima temperatura de soldadura deberá ser inferior a 150 °C y se deberá mantener cordones cortos con baja o nula oscilación de arco. Con chapas superiores a 3 mm se debe emplear precalentamiento de 50-60 °C, realizando el enfriamiento de forma rápida con algún tipo de fluido y evitando la zona de 400-900 °C. (Celada, 2015). Celada indica que el proceso de soldadura adecuado para la unión de elementos con espesores superiores a 3mm en acero inoxidable 304 debe ser el proceso SMAW y se tiene que emplear un electrodo AISI 308L como material de aporte para la unión de estos elementos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del problema

La posibilidad de obtener fallas en un cordón de soldadura depende del proceso de soldadura y del material de aporte que se utilice. La efectividad para localizar fallas en un cordón de soldadura dependerá del tipo de ensayo no destructivo que se aplique y del personal encargado para llevar a cabo estos ensayos. Los procesos de soldadura que serán aplicados en la tubería de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro serán: soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) y soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas inerte (GTAW).

Se debe considerar el efecto que tiene un proceso de soldadura inadecuado y el tipo incorrecto de electrodo o varilla de aporte al realizar uniones soldadas. En ocasiones, el técnico soldador desconoce las fallas que pueden ser ocasionadas debido a un mal proceso de soldadura o material de aporte. La investigación pretende que, mediante la aplicación de ensayos no destructivos de ultrasonido, rayos x y análisis metalográfico, se pueda determinar el proceso y material de aporte adecuado para las soldaduras realizadas en tuberías de acero inoxidable 304 de 2".

Según la experiencia del investigador y en conversaciones con la empresa, se tiene la problemática con la calidad de las soldaduras realizadas. Los técnicos desconocen cuáles son los efectos de emplear un proceso y material de aporte inadecuado para la unión de tuberías de acero inoxidable. Desconocen también qué proceso de soldadura es el adecuado, por lo que los

objetivos serán dirigidos a determinar el proceso de soldadura y material de aporte adecuado.

Al realizar una soldadura se pretende que, tanto el material base como el material de aporte, tengan las mismas propiedades físicas, químicas y mecánicas, obteniendo con esto menores probabilidades de falla por la unión de materiales disímiles o por malos proceso de soldadura. Los ensayos no destructivos de ultrasonidos, rayos X y el análisis metalográfico deben realizarse correctamente para obtener resultados satisfactorios y que sean determinantes para la solución al problema de investigación.

Como consecuencia de los problemas suscitados surgen las siguientes preguntas:

2.2. Planteamiento de las preguntas de investigación

Pregunta general:

- ¿Los ensayos no destructivos son técnicas adecuadas para la selección del proceso de soldadura (SMAW o GTAW) apropiado para la unión de tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro?

Preguntas específicas:

- ¿Cuál es el proceso de soldadura que produce menores defectos según el análisis de resultados obtenido a partir de la aplicación de técnicas de ensayos no destructivos?
- ¿Qué proceso de soldadura conlleva mayores costos para su fabricación en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro?

- ¿Cuáles son los resultados de fabricar una soldadura con electrodo o varilla de aporte inadecuado en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro?

2.3. Delimitación de la investigación

El siguiente estudio se limitará a la aplicación de ensayos no destructivos como técnica para la determinación del proceso de soldadura adecuado (GTAW y SMAW) para la unión de tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro. A partir de la aplicación de los ensayos no destructivos de ultrasonidos, rayos x y análisis metalográfico, se obtendrán resultados que serán analizados para establecer el proceso de soldadura y material de aporte adecuado para la unión de tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40.

El proceso de soldadura se llevará a cabo con la ayuda de un técnico soldador con experiencia en el área de fabricación de soldaduras. La investigación será experimental, ya que identificará el proceso de soldadura adecuado para tuberías de acero inoxidable cédula 40 de 2" de diámetro, empleando ensayos no destructivos de ultrasonido, rayos X y análisis metalográfico para la evaluación de cada proceso de soldadura.

Del desarrollo de la siguiente investigación surgen las siguientes limitaciones: los equipos e instrumentos a utilizar para llevar a cabo los ensayos no destructivos serán suministrados por el asesor de esta investigación; el equipo de soldadura y herramienta eléctrica a utilizar serán suministrados en forma de préstamo por la empresa en la cual se desarrollará la investigación; los materiales consumibles tales como electrodos, varillas de aporte, discos de lija, mopas, discos de corte, discos para pulir, gel decapante, discos de

alambre, tungstenos, etc., serán suministrados en su totalidad por el investigador.

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a las necesidades que se tienen actualmente en la industria guatemalteca, las empresas encargadas de proyectos de instalaciones mecánicas ven la necesidad de aplicar ensayos no destructivos como método para la evaluación de soldaduras y pronóstico de su vida útil, por tal razón surge la presente investigación. Este trabajo está contemplado en la línea de investigación correspondiente a la aplicación de procedimientos para aumentar la vida útil de un material a través de técnicas de ensayos no destructivos, ante la necesidad de realizar soldaduras en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro, que son comúnmente empleadas en la industria para el transporte de vapores y gases corrosivos y en donde las tuberías de hierro negro no se deben utilizar, ya que no poseen la capa protectora que evita su oxidación, la cual cede sus electrones al medio circundante.

El costo que representa una soldadura inadecuada puede perjudicar el presupuesto de un proyecto de instalaciones mecánicas, ya que se aplican garantías que pueden representar hasta el 5 % del total del proyecto, debido a la presencia de fugas o corrosión prematura en los elementos soldados. Los costos de la investigación se justifican al disminuir la posibilidad de que el cliente proceda con garantías que afecten la ganancia obtenida del proyecto.

La investigación pretende que, mediante técnicas de ensayos no destructivos de ultrasonidos, rayos x y análisis metalográfico, se defina el proceso de soldadura adecuado para tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40. Cada ensayo no destructivo tiene como objetivo determinar las fallas o discontinuidades presentadas en cada proceso de soldadura.

La identificación del proceso de soldadura adecuado permite a las empresas desarrollar un criterio de selección a partir de la observación de los efectos ocasionados por la mala selección del proceso de soldadura y del material de aporte. Los costos de fabricación son otro factor de interés al realizar uniones soldadas. Se espera que los beneficiados con la investigación sean tanto técnicos como supervisores del área de proyectos de instalaciones mecánicas, así como el público en general que esté interesado en ampliar sus conocimientos con respecto a los procesos de soldadura en tuberías de acero inoxidable.

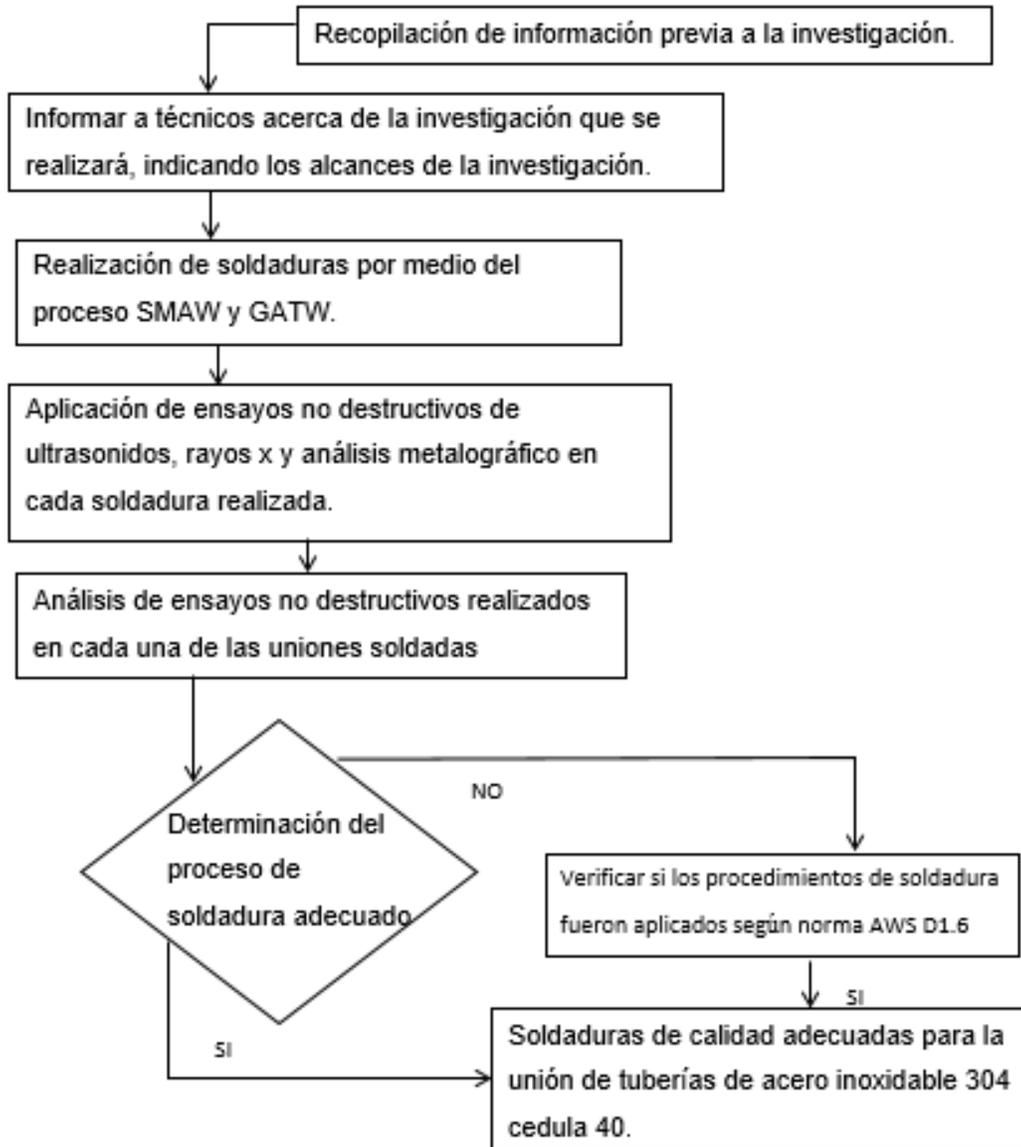
4. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Se debe desarrollar un criterio de calidad en las soldaduras realizadas por parte del personal técnico y supervisores del departamento de instalaciones mecánicas. Tal desarrollo del criterio de calidad se busca sea por medio de la información obtenida posterior al análisis de resultados de la investigación. Se pretende que tanto personas como empresas interesadas en el tema tengan información disponible de este tema.

El suministro de herramienta eléctrica, equipos para llevar a cabo los ensayos no destructivos y materiales consumibles tales como mopas, discos de corte, discos de lija, esponjas, amoladoras, máquinas para procesos SMAW, GTAW, electrodos, varillas de aporte, serán vitales para el desarrollo de la investigación. Los ensayos no destructivos de ultrasonidos, rayos X y análisis metalográfico se realizarán con la ayuda del asesor de la investigación, obteniendo así la posibilidad de efectuar correctamente la aplicación de los ensayos no destructivos.

Se debe contar con un técnico soldador con experiencia en los procesos de soldadura a utilizar (GTAW y SMAW) si se desea llevar cabo con éxito la investigación. Gran parte de las fallas y discontinuidades se deben al personal y a malos procedimientos de soldadura.

Figura 1. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Acero inoxidable

Un acero inoxidable es aquel que tiene elevadas propiedades anticorrosivas, por lo cual son muy comunes en aplicación donde se requiere una alta durabilidad ante ambientes corrosivos.

5.1.1. Definición

“Se llaman inoxidables porque en presencia de oxígeno (aire) forman una película delgada y dura muy adherente de óxido de cromo, que protege al metal contra la corrosión (pasivación)” (Kalpakjian & Schmid, 2002, p.148).

5.1.2. División de los aceros inoxidables

Kalpakjian y Schmid dividen a los aceros inoxidables de la siguiente manera:

5.1.2.1. Austeníticos (serie 200 y 300)

Aceros cuya composición contiene níquel, cromo y manganeso. De características antimagnéticas, poseen una excelente resistencia a la corrosión, siendo susceptibles a agrietamientos. Los aceros inoxidables austeníticos son endurecidos por medio del trabajo en frío, siendo los más dúctiles de todos los aceros inoxidables.

5.1.2.2. Ferríticos (serie 400)

Son aceros con un contenido elevado de cromo. Son magnéticos y poseen una alta resistencia a la corrosión, poseen una menor ductilidad en comparación con los aceros inoxidable austeníticos. Estos aceros pueden ser endurecidos por medio del trabajo en frío, con la diferencia de que no pueden ser sometidos a tratamiento térmico.

5.1.2.3. Martensíticos (serie 400 y 500)

Un gran porcentaje de los aceros inoxidable martensíticos carecen de níquel, incrementando su dureza por medio de tratamiento térmico. Son aceros magnéticos de excelente dureza y resistencia a la fatiga, con una resistencia moderada a la corrosión.

5.1.2.4. Endurecidos por precipitación (PH)

Aceros con contenidos de cromo y níquel, además de cobre, aluminio, titanio o molibdeno. De moderada resistencia a la corrosión y buena ductilidad, soportando temperaturas altas. Los diferentes tipos de aceros inoxidable se pueden visualizar en la tabla I, en la cual se especifican las aplicaciones de uso para cada uno de estos.

Tabla I. **Clasificación de los aceros inoxidable**

Martensíticos	
403	Utilizado en componentes críticos de maquinaria, sometidos a altos esfuerzos y donde se necesita de una elevada resistencia al desgaste, calor, corrosión.
410	De uso general debido a las características que posee y a su bajo costo. Se emplea en elementos de unión como tuercas, tornillos, cubiertos, componentes de hornos.

continuación de tabla I.

416	Una versión del 410 donde se adicionan elementos como el azufre o selenio con el propósito de desarrollar mejores características de maquinabilidad. Se utilizan en partes de bombas, cabezas de palos de golf, flechas.
420	Modificación al acero 410 debido al alto contenido de carbono, obteniendo una elevada dureza y resistencia al desgaste, disminuyendo la resistencia a la corrosión del acero, su empleo se ve en instrumentos dentales y quirúrgicos, hojas de cuchillos.
422	Específico para el servicio a elevadas temperaturas de hasta 650 °C, presenta una maquinabilidad baja.
431	Utilizados ampliamente para la fabricación de conectores, cerraduras, flechas de bombas, equipo marino.
440	Empleados en aplicaciones donde se desea obtener elevada y extrema dureza, resistencia a la corrosión y abrasión. De baja maquinabilidad. Se utilizan en aplicaciones de cuchillería, inyector, equipo quirúrgico.
Ferríticos	
405	Distinguido como el acero soldable del tipo 410, altamente utilizado en aplicaciones resistentes al calor como racks para el templado del acero.
409	Es altamente empleado en lugares en donde se necesita de una alta calidad de apariencia. Utilizado para la fabricación de convertidores y silenciadores catalíticos, contenedores.
430	Las características principales son su elevada resistencia a la corrosión, buena formabilidad y elevada ductilidad. Se emplea en aplicaciones de muebles y decoración interior, adornos y molduras.
434	Parecido al 430 con la diferencia que contiene molibdeno y niobio, componentes que incrementan la resistencia a la corrosión, es altamente utilizada en usos automotrices exteriores.
446	Se considera con el máximo contenido de cromo de la familia ferrítica, obteniendo una mayor resistencia a la corrosión, su uso es recomendado para atmósferas con alto contenido de azufre en condiciones de altas temperaturas (1000 °C). No se deben emplear en aplicaciones en donde se requiera una alta resistencia mecánica. Se utiliza en quemadores, tubos para pirómetros, válvulas y conectores.
Austeníticos	
301	De elevada formabilidad y buena soldabilidad. Se utiliza en aplicaciones de partes de aviones, cajas de ferrocarril, equipos para procesamiento de alimentos.

continuación de tabla I.

303	Acero de elevada maquinabilidad, elevada resistencia a la corrosión en ambientes agresivos de hasta 900 °C. Se utilizan para la fabricación de bombas, partes de máquinas.
304	De uso general. Se recomiendan para diseños ligeros soldados en donde se requiera de elevada resistencia a la corrosión. Posee un excelente desempeño a temperaturas de 800 – 900 °C. Se utilizan en aplicaciones como equipo químico de proceso, accesorios para aviones, remaches, aplicaciones alimenticias.
309	De elevada resistencia mecánica, tenacidad y resistencia a la corrosión en temperaturas cercanas a los 1000 °C. Comúnmente utilizados en calentadores de aire, equipo químico de proceso, componentes de quemadores de turbinas a gas.
310	Altamente empleado en trabajos de altas temperaturas. Se emplean para la fabricación de calentadores de aire, equipo para tratamiento térmico de aceros.
316	De elevada resistencia a la corrosión frente a productos químicos agresivos como ácidos y atmósferas salinas. Comúnmente empleados para el procesamiento de alimentos, aplicaciones farmacéuticas y fotográficas.
321	Parecido al acero 304, con la diferencia que se aplica titanio equivalente a cinco veces el contenido de carbono. Las aplicaciones destacadas son: recipientes a presión y almacenamiento, partes de motores de jet.

Fuente: Instituto Mexicano del Inoxidable. (2008). *Manual de aceros inoxidables*.

5.2. Tuberías

Una tubería es un conducto que cumple la función de transportar fluidos.

5.2.1. Tipos de tuberías

Las tuberías se fabrican en tres diferentes maneras (Quimi Net, 2011) indica:

- Tuberías sin costuras. Es un tipo de tubería que se fabrica a partir de un lingote cilíndrico, el cual se calienta previo al proceso de la extrusión. Se caracteriza por ser una de las mejores tuberías para la contención de la presión. Tal tubería puede ser apreciada en la ilustración 2, donde se puede observar un conjunto de tuberías sin costura.
- Tuberías con costura longitudinal. Este tipo de tuberías se forma a partir del rolado de láminas, logrando así el cierre cilíndrico de la lámina y por medio de un proceso de soldadura se unen ambas secciones.
- Tuberías con soldadura helicoidal. En este caso la soldadura no llega a ser recta, es decir, esta recorre la tubería, dando la forma de una tubería roscada o en espiral.

5.2.2. Usos de las tuberías

- Sistema de abastecimiento de agua
- Desagües
- Gas
- Calefacción y climatización
- Generación de energía
- Industria petroquímica
- Industria alimenticia
- Aplicaciones médicas
- Industria automotriz

Figura 2. **Tuberías de acero inoxidable cédula 40**



Fuente: INT. *Inoxidables*. (2018). <http://www.intinoxidables.com/pipe.php>.

5.3. Soldadura

“Una soldadura se define como la unión o fusión de estructuras de granos de los materiales, la fusión se logra por medio de la aplicación de calor a temperaturas de soldadura, con o sin aplicación de presión.” (Jeffus, 2009).

5.4. Soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW)

Jeffus establece que la soldadura por arco metálico protegido (SMAW) es un proceso en el cual, se emplea un electrodo recubierto como fundente para cerrar el circuito eléctrico, la corriente forma un arco entre el extremo del electrodo y la pieza, el arco es capaz de generar el calor necesario para derretir ambos. El metal derretido se deposita en un baño de metal fundido. La punta del electrodo y el baño fundido del metal están rodeados por una atmósfera en forma gaseosa que protege al cordón de soldadura, la cubierta de escorias se produce a medida que se avanza con el electrodo impidiendo la presencia de hidrógeno. Es el proceso de soldadura más utilizado debido a su bajo costo, portabilidad y versatilidad.

5.4.1. Ventajas y desventajas del proceso SMAW

Ventajas:

- Las máquinas del proceso de soldadura SMAW tienen un bajo costo respecto a las máquinas de los otros procesos con arco eléctrico.
- Se puede aplicar a la gran mayoría de los metales.
- Bajo costo en el valor de los insumos, ya que no necesita gases o electrodos especiales.

Desventajas:

- Menor calidad de las juntas soldadas respecto a los otros procesos de soldadura con arco eléctrico.
- Baja productividad por cambio de electrodos.
- Se necesita mayor destreza de los operarios que en los procesos MIG-MAG y TIG.

5.4.2. Equipo

Para realizar el proceso de soldadura SMAW se emplea la máquina de soldar, la cual genera una corriente con alto amperaje y bajo voltaje, a diferencia de la corriente del suministro de red, que tiene bajo amperaje y alto voltaje. La máquina consta de dos cables, el cable portaelectrodo y el cable de tierra. (Pazos, 2006). La máquina comúnmente utilizada para llevar a cabo el proceso de soldadura SMAW se puede ver en la figura 3, en donde se observa el cable para tierra y el cable portaelectrodo.

Figura 3. **Máquina para proceso SMAW**



Fuente: Lincoln Electric. (2017). *Soluciones en soldadura y corte.*

<https://www.lincolnelectric.com/esmx/support/Documents/CATALOGO%20GENERAL%202017%20Digital.pdf>.

El electrodo, como se puede apreciar en la figura 4, es el elemento que cierra el circuito, conectando al cable portaelectrodo con el aire ionizado. Se denominan electrodos desnudos a los electrodos sin recubrimiento y revestidos a los electrodos con recubrimiento.

Figura 4. **Electrodos revestidos**



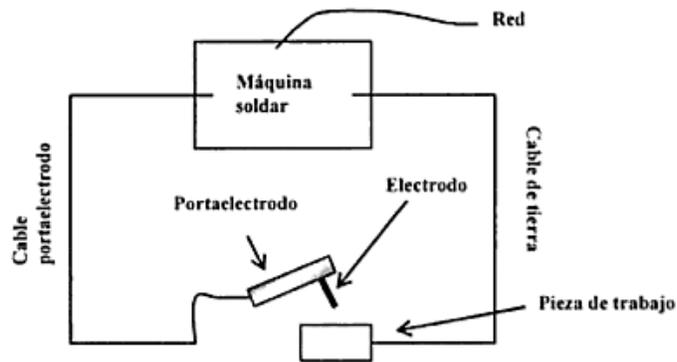
Fuente: ECA, electrodos. (2017). *Electrodos ECA Hobart.*

<https://proaceros.webnode.es/products/electrodos-eca-hobart/>.

5.4.3. Polaridades

Jeffus indica que, debido a la versatilidad del proceso SMAW, se tiene la posibilidad de emplear corriente directa o alterna. Al usar corriente directa, se tienen dos tipos de polaridades: polaridad directa o negativa, en la cual el polo negativo se conecta al cable portaelectrodo, y polaridad normal o positiva, obtenida cuando se conecta el polo positivo al cable porta electrodo. Cuando se usa corriente alterna, la polaridad del arco cambia alrededor de cien veces por segundo. Esto se puede observar en la figura 5, donde se ilustra el circuito utilizado para generar la resistencia que forma el arco eléctrico.

Figura 5. **Polaridades del proceso SMAW**



Fuente: JEFFUS, L. (2009). *Soldadura, principios y aplicaciones*.

El inicio del arco se realiza colocando la punta del electrodo en contacto con el material base, posteriormente se realiza la separación lenta entre el electrodo y el material base. Este procedimiento enciende el arco, ionizando el aire en el área circundante, generando temperaturas en el orden de los 5000 °C.

5.4.4. Factores que influyen en la calidad de la soldadura

“La calidad de la soldadura depende de varios factores, entre los cuales se encuentran la longitud del arco, la velocidad de avance y la intensidad de corriente” (Pazos, 2006, p.268).

- La separación entre el electrodo y la pieza de trabajo se conoce como longitud del arco. La longitud del arco debe ser igual al diámetro del electrodo.
- El diámetro del cordón de soldadura depende de la velocidad de avance, una velocidad adecuada producirá un cordón cuyo ancho sea igual a dos veces el diámetro del electrodo.
- La corriente en amperios debe ser igual al diámetro del electrodo en milésimas de pulgada, dependiendo del peso de la pieza a soldar, una pieza pesada requerirá una mayor cantidad en la intensidad de corriente que en una pieza liviana.

El fundente es el material empleado para proteger a la soldadura de óxidos e inclusiones. Los electrodos pueden ser consumibles o no consumibles, dependiendo de su temperatura de fusión. Si la temperatura de fusión del electrodo es mayor que la temperatura del arco, el electrodo es no consumible; si es menor, el electrodo es consumible y necesita de un fundente protector.

El electrodo está formado por dos partes: el revestimiento cerámico y el núcleo metálico. El núcleo se derrite para obtener el material de aporte. La atmósfera protectora se genera a partir de la combustión del revestimiento cerámico, protegiendo la zona de soldadura de la presencia de oxígeno y nitrógeno, lo cual produce una soldadura más limpia y resistente.

5.4.5. Clasificación de los electrodos

“Los electrodos se seleccionan primero en base al metal a soldar y luego de acuerdo al tipo de recubrimiento” (Alvarado & Flores, 2006, p.41). Como se indica en el Manual de Soldadura y catálogo de productos de Soldexa (2017), los electrodos para la soldadura en acero inoxidable se clasifican de la siguiente manera:

- E308L-16: material exento de poros y de buen acabado. El revestimiento rutilico proporciona excelentes características de soldabilidad en corriente continua y corriente alterna. Se aplican todas las posiciones de soldeo 1G (plana), 2G (horizontal), 3G (vertical ascendente), 4G (sobre cabeza). Utilizado en aplicaciones de reconstrucción de piezas como palas, cucharones, tanques, tuberías, ductos, industria cervecera, láctea, textil y papelera. Ideal para soldar aceros inoxidables austeníticos, AISI 301, 302, 304, 308.
- E347-16: electrodo que deposita un material estabilizado con columbio. El material depositado es resistente bajo gases oxidantes de combustión hasta 800°C, la adición de columbio evita la formación de carburos de cromo en la unión. Las posiciones de soldeo son 1G, 2G, 3G y 4G. Ideal para la soldadura de aceros estabilizados AISI 321, 347. Aceros donde es necesario reducir la posibilidad de corrosión intergranular. Para fabricar o reparar intercambiadores de calor, para aplicaciones en industrias alimenticias, papelera, textil y petroquímica.
- E307-16: electrodo austenítico, el contenido de Mn le confiere la capacidad de auto endurecerse en trabajo hasta 50 HRC. Las posiciones de soldeo son 1G, 2G, 3G, y 4G. Diseñado para unir y recargar piezas de acero al carbón, de baja aleación y al manganeso. Se utiliza para recuperar piezas que han sufrido desgaste por fricción metal-metal. Para

relleno de cadenas, tambores, coronas dentadas y para recuperación de dientes de engranaje.

- E316L–16: electrodo rutilico para soldar aceros inoxidables con contenidos del 16 % al 20 % de cromo, el contenido de cromo le confiere gran resistencia a la corrosión y oxidación inclusive a temperaturas elevadas. Las posiciones de soldeo son 1G, 2G, 3G y 4G. Ideal para soldar aceros AISI 316L, 317L, 318L. Para la fabricación de recipientes, ductos, tuberías que estén expuestos a los ataques químicos por sales o ácidos.
- E310–16: electrodo rutilico cuyo depósito es 100 % austenítico. Con excelente resistencia a la fricción, impacto, corrosión y oxidación. Con un arco estable, poco chisporroteo y salpicaduras empleando un bajo amperaje. Las posiciones de soldeo son 1G, 2G, 3G y 4G. Para fabricación o reparación de intercambiadores de calor, quemadores, tuberías, ejes, válvulas, bombas, ganchos.

5.5. Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW)

Jeffus señala que la soldadura GTAW es un proceso de soldadura de arco que consta de un electrodo de tungsteno (no consumible) y una pieza a soldar. La aplicación de un gas inerte contribuye en la protección del baño de fusión del oxígeno presente en el aire sin la aplicación de presión. En la ilustración 6 se puede observar la típica maquina empleada para llevar a cabo el proceso de soldadura GTAW y en la figura 7 se observa el proceso de soldadura y cómo se genera el cordón de soldadura.

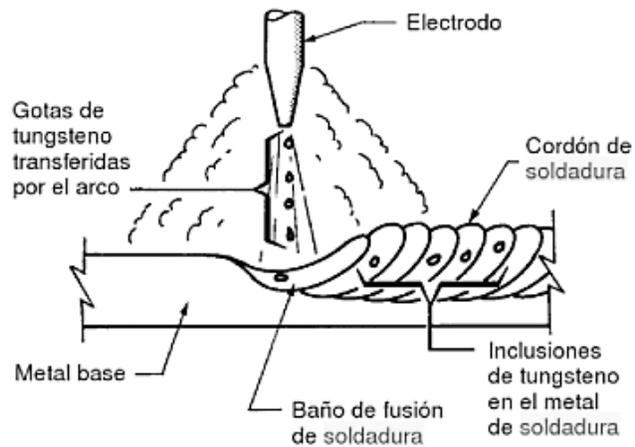
Figura 6. **Equipo para soldadura GTAW**



Fuente: Lincoln Electric. (2017). *Soluciones en soldadura y corte*.

<https://www.lincolnelectric.com/esmx/support/Documents/CATALOGO%20GENERAL%202017%20Digital.pdf>.

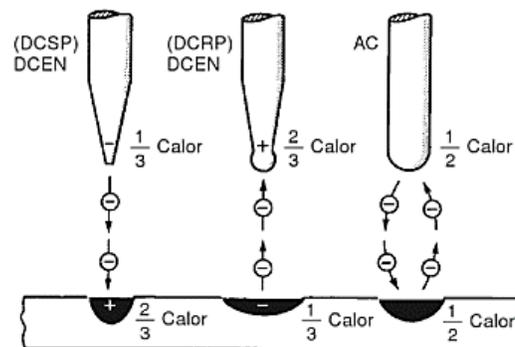
Figura 7. **Proceso de soldadura GTAW**



Fuente: Jeffus, L. (2010). *Manual de soldadura GTAW (TIG)*.

El tipo de corriente que más se emplea es la corriente continua (CC) de polaridad directa, eso es, el electrodo conectado al polo negativo y la corriente alterna (CA). La corriente eléctrica influye en la forma en la cual el electrodo de tungsteno se deposita en la unión soldada, esto se puede observar en la ilustración 8, en la cual se observa la forma de gota que se genera según la corriente eléctrica utilizada.

Figura 8. **Distribución de calor en el electrodo de tungsteno**



Fuente: Jeffus, L. (2010). *Manual de soldadura GTAW (TIG)*.

El tungsteno se emplea como electrodo debido a características como: elevadas temperaturas de fusión y buenas características eléctricas. La adición del metal de aporte en forma de varillas o alambre proporciona el refuerzo necesario de soldadura y cambia su química.

5.5.1. Características de la soldadura

“A la GTAW se le considera uno de los más versátiles de todos los procesos de soldadura” (Jeffus, 2010, p.2). Como indica Jeffus, tal versatilidad se puede observar al realizar soldaduras en casi cualquier metal, posición y espesor de chapa, placa o tubo.

El proceso de soldadura GTAW es un proceso muy limpio y versátil, sin residuos de escoria, por lo que no es necesaria una limpieza posterior. El argón es un producto derivado de la producción de oxígeno y es utilizado como medio de protección para el proceso de soldadura GTAW. La mayor desventaja que presenta este proceso es el tiempo para su elaboración, ya que representa un incremento en los costos totales. No obstante, estos costos se consideran menores en relación a las soldaduras que se producen. Otra desventaja a considerar es el espesor de 6mm o 0.25" del material a soldar.

5.5.2. Contaminación de la soldadura

Como lo explica Jeffus, la soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno es un proceso que no emplea electrodos consumibles. La falta de fundente aumenta la posibilidad de contaminación en la soldadura. Las principales fuentes de contaminación son:

- Aceite, suciedad, grasa, hidrógeno y óxidos, pueden contaminar el material de aporte antes de su fusión.
- Aire u oxígeno presente en el gas protector, ocasionado por una mala conexión en el sistema.
- La presencia de aceites o suciedad en las manos del operador puede contaminar el metal base, afectando a la soldadura realizada.

En cuanto al aporte de calor, “las secciones delgadas de acero son altamente susceptibles a la deformación o alabeo como resultado de la velocidad de avance lenta y la alta aportación desde el proceso GTAW” (Jeffus, 2010, p.4). Como explica Jeffus, en secciones de pequeño espesor se producen deformaciones debido al calor aportado, por el contrario, en secciones de mayor grosor disminuye la tendencia a la formación de estructuras martensíticas.

El proceso de soldadura GTAW posee una velocidad de avance relativamente lenta, generando una mayor cantidad de calor aplicado. La cantidad de calor aplicado puede ser una ventaja o una desventaja, dependiendo de los metales o aleaciones a soldar, el espesor de estos y la configuración de la soldadura.

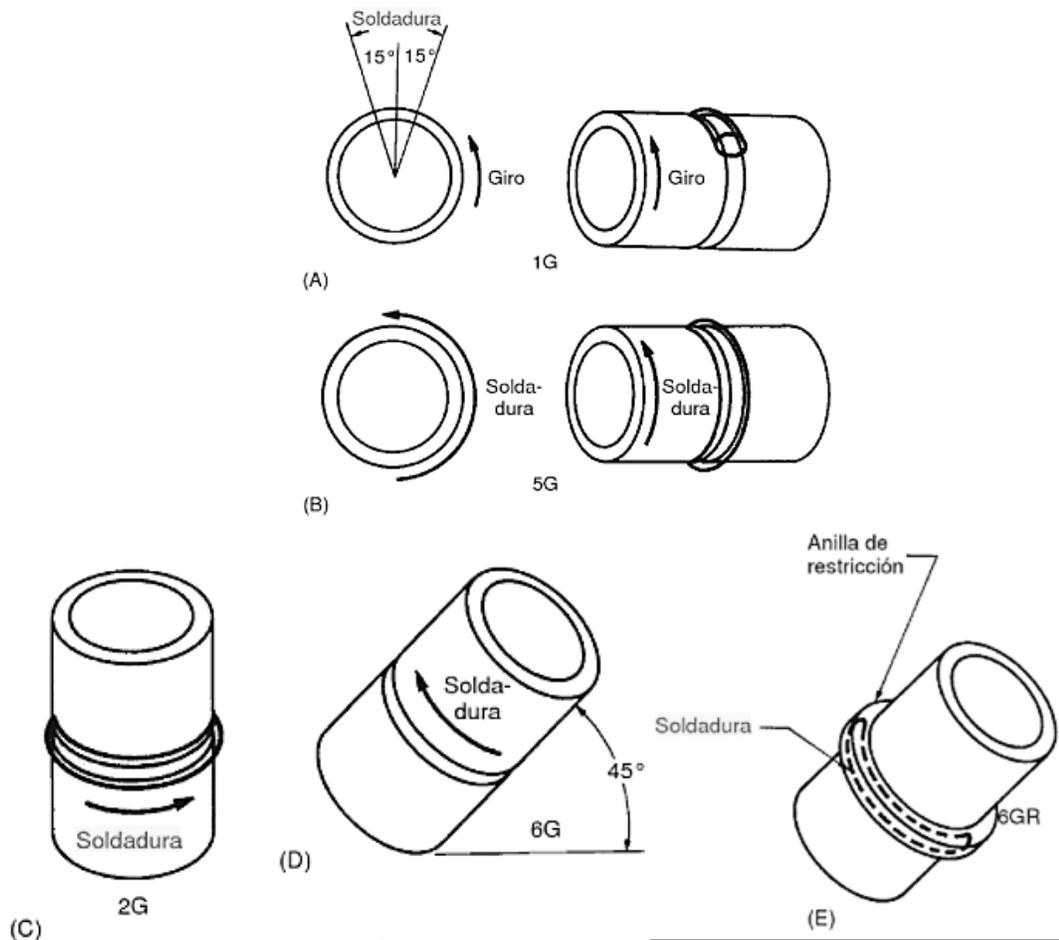
5.5.3. Posiciones de soldadura de tubos

“La American Welding Society Pipe ha dividido la soldadura de tubos en las siguientes 5 posiciones básicas” (Jeffus, 2009, p.7). Las posiciones de soldeo establecidas por la AWS se pueden observar en la figura 9, donde se especifica tanto la posición de tubo como el giro que debe efectuar el soldador con el portaelectrodo.

- Posición (1G) horizontal con giro: el tubo se gira, continua o intermitentemente, para que la soldadura se realice entre 0° y 15° de la parte superior del tubo.
- Posición fija horizontal (5G): el tubo está en posición horizontal y la soldadura se hace verticalmente, alrededor del tubo.
- Vertical (2G): el tubo está en posición vertical y la soldadura se hace horizontalmente, alrededor del tubo.

- Inclínada (6G): el tubo está fijo, formando un ángulo de 45°, la soldadura se hace alrededor del tubo.
- Inclínada con un anillo de restricción 6GR: el tubo está fijo, formando un ángulo de 45°, y se coloca un anillo de restricción alrededor del tubo, debajo de la ranura de la soldadura.

Figura 9. Posiciones de soldadura en tubos



Fuente: Jeffus, L. (2010). *Manual de soldadura GTAW (TIG)*.

La versatilidad del proceso GTAW permite soldar en casi cualquier geometría de junta. Se pueden soldar placas o láminas con espesor igual o menor de 9,5 mm (3/8 de pulgada) y tubos o tuberías con diámetros de 2,54 a

15,24 cm (1 a 6 pulgadas). Las secciones con mayor espesor se pueden soldar, pero no resulta factible económicamente.

En cuanto a las formas del extremo del tungsteno, Jeffus, señala que, para ejecutar una buena unión soldada, se debe dar la forma correcta al extremo sin punta de un electrodo de tungsteno nuevo. Existen tres formas, las cuales corresponden según el tipo de corriente de soldadura, estas son:

- Punta afilada para corriente continua y el electrodo conectado al polo negativo.
- Extremo redondeado para corriente alterna.
- Afilado con un pequeño extremo redondeado para corriente continua y electrodo conectado al polo positivo.

5.5.4. Varillas de aporte

Las varillas de aporte, tanto del proceso TIG como el proceso MIG-MAG, deben tener las mismas propiedades y características que el material que se va a soldar, o inclusive ser mejores. (Orozco y López, 2013). En la tabla II se puede observar tal relación, entre el electrodo a utilizar y el material base a soldar.

Tabla II. **Relación entre varilla de aporte y acero inoxidable a soldar**

No. AISI	No. Relleno AWS
303	ER308
304	ER308
304L	ER308L
309	ER309
310	ER310
316	ER316
316L	ER316L

Fuente: JEFFUS, Larry. *Soldadura: principios y aplicaciones*.

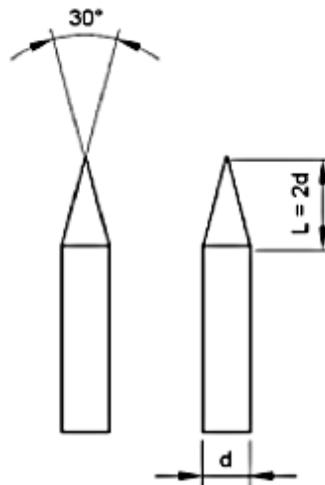
5.5.5. Electrodo de tungsteno

El electrodo es considerado como no consumible, ya que no aporta material al baño de fusión, el único desgaste que representa es debido a los sucesivos afilados, lo que lo convierte en un material consumible. Su función es la de establecer y mantener el arco eléctrico, resistiendo temperaturas cercanas a los 3500°C.

5.5.6. Afilado del electrodo de tungsteno

“El extremo del electrodo debe tener la forma correcta para permitir el cebado del arco y evitar el arco inestable”. (Orozco y López, 2013, p. 44). La forma que debe tener el electrodo de tungsteno puede observarse en la ilustración 10, donde se establecen medidas para cada electrodo.

Figura 10. **Filo del tungsteno**



Fuente: OROZCO, F; LÓPEZ, C. (2013). *Soldadura en atmósfera protegida*.

Los tungstenos para los aceros inoxidables deberán tener una longitud de filo de dos veces el diámetro del tungsteno y un ángulo de punta de 30°.

Para otro tipo de metales, aluminio y sus aleaciones, el afilado de la punta se realizará ligeramente en forma cónica o redondeada.

5.5.7. Ventajas del proceso GTAW

- Soldaduras limpias de alta calidad
- Suelda una amplia gama de metales
- Sin salpicaduras, escoria, chispas ni humo
- Permite soldar en todas las posiciones

5.5.8. Desventajas del proceso GTAW

- Velocidades de deposición más bajas.
- Requiere un alto nivel de destreza del operador.
- Un nivel más alto de rayos UV.
- Requiere buen ojo y coordinación manual para lograr soldaduras de calidad.
- Dificultad para trabajar al aire libre.
- Mayor costo del equipo.

5.6. Ensayos no destructivos

“Los ensayos no destructivos se utilizan para detectar discontinuidades en piezas metálicas y no metálicas. Las discontinuidades son interrupciones en la estructura, y en algunos casos pueden haber sido introducidas

intencionalmente” (Pazos, 2006, p.291). También se define al defecto como aquella discontinuidad que afecta a los criterios de aceptación, menoscabando la utilidad de la pieza. Una característica notable de los ensayos no destructivos es que no ocasionan daño a los materiales ensayados, por lo cual después de su aplicación, los materiales pueden ser utilizados nuevamente. Estas pruebas permiten la identificación de materiales defectuosos antes de que sean conformados, maquinados, ensamblados o puestos en servicio. El rechazo o aceptación de una pieza con defectos depende del uso al que esté destinada.

5.6.1. Tipos de ensayos no destructivos

- Inspección por líquidos penetrantes
- Inspección por partículas magnéticas
- Inspección por ultrasonido
- Inspección por rayos x
- Inspección por corrientes parásitas

5.6.2. Clasificación de los END

La clasificación de los ensayos no destructivos se establece según sea la posición donde se encuentre localizada la discontinuidad (Romero y Probeste, 2013), por lo que se clasifican en:

- END superficiales: proporcionan información acerca de la sanidad superficial de los materiales inspeccionados, por medio de la aplicación de END de inspección visual (VT), líquidos penetrantes (PT), partículas magnéticas (PM), electromagnetismo (ET).
- END herméticos: determinan la información relativa al grado en que pueden ser contenidos los fluidos en un recipiente sin que escapen a la

atmósfera. Las pruebas a realizar en los END herméticos son: pruebas de fuga (LT), pruebas de burbujas, pruebas de presión.

- END volumétricos: suministran información sobre la integridad interna de los materiales inspeccionados. Los END comúnmente aplicados son: la radiografía industria (RT), ultrasonido industrial (UT) y emisión acústica (AE).

5.7. Ensayo de ultrasonidos

El ultrasonido se transmite y se propaga dentro de una pieza hasta que es reflejado; el ultrasonido reflejado regresa a un receptor proporcionándole información acerca de su recorrido; la información proporcionada se basa en la calidad de energía reflejada del ultrasonido y en su distancia recorrida como lo indican Romero y Proboeste. También indican los componentes principales a utilizar para llevar a cabo los END por ultrasonidos, siendo estos:

- Un generador de señal eléctrica
- Un conductor de señal eléctrica o un cable coaxial
- El accesorio que convierte la señal eléctrica en mecánica y/o viceversa
- Un medio para transferir la energía acústica a la pieza y viceversa

En la figura 11 se puede observar el equipo para llevar a cabo la aplicación del ensayo no destructivo por ultrasonidos, en donde una pantalla muestra los resultados obtenidos por medio de gráficas.

Figura 11. **Equipo de inspección por ultrasonidos**



Fuente: OLYMPUS. (2018). *Aparato de inspección PND por ultrasonidos, EPOCH 1000 SERIES*. <http://www.directindustry.es/prod/olympus/product-17434-394666.html>.

5.7.1. Ventajas

- Gran poder de penetración, lo que permite la medición de grandes espesores.
- Gran sensibilidad, lo que facilita la inspección de discontinuidades extremadamente pequeñas.
- Se necesita una sola superficie de acceso.
- La interpretación de resultados es inmediata.
- No existe peligro en la utilización del equipo.
- Los equipos son portátiles.

5.7.2. Desventajas

- Se requiere de técnicos experimentados para la interpretación de resultados.
- La inspección se torna difícil en superficies rugosas e irregulares, así como en piezas pequeñas y muy delgadas.
- Las discontinuidades subsuperficiales no pueden ser detectadas.
- Es necesario patrones de referencia para la calibración de equipos y caracterización de discontinuidades.

5.7.3. Clasificación de las técnicas por ultrasonidos

Como se indica en uno de los artículos de Intertek Group plc (2018), las técnicas de evaluación por ultrasonidos se clasifican en:

- Ultrasonido convencional (pulso eco): técnica de evaluación volumétrica de soldaduras y componentes metálicos (moldeados, laminados, forjados) mediante un haz recto o angular.
- TOFD (*time of flight diffraction*): técnica de evaluación volumétrica de soldaduras por medio de la optimización del efecto de la difracción de las ondas, también conocidas como *time of flight diffraction*. La técnica TOFD es aceptada por ciertas normas como sustituto de radiografías, gracias a la posibilidad de dejar registro de la inspección realizada.
- Técnica Pushed Array: es una técnica avanzada de tipo pulso eco que hace uso de palpadores multielemento, que permiten una exploración con diversos ángulos y focalizaciones, dejando registro de la inspección realizada.

- Técnica de medición de espesores: la medición precisa del espesor de pared en tuberías, tanques y se optimiza por medio del efecto de resonancia de las ondas. Permite la detección de pérdidas de espesor producidas por fenómenos degradatorios como erosión o corrosión.

5.7.4. Aplicaciones

La versatilidad de los ensayos por ultrasonidos abarca una amplia gama de aplicaciones dentro de la industria, tanto en el ramo de servicios como de fabricación y en mantenimiento:

- Inspección del volumen completo de soldaduras y recargas para la detección de defectos como faltas de fusión, grietas, escorias, inclusiones, etc.
- Inspección de componentes para detección de defectos como grietas, cavidades, inclusiones.
- Medición de espesores. Para comprobar erosiones o desgastes y vigilar el envejecimiento de la pieza o elemento.
- Detección de bolsas de aire o gas en tuberías de proceso para evitar cavitación en el arranque de bombas.

5.7.5. Discontinuidades detectadas por los ultrasonidos

“Las discontinuidades que se producen en soldadura, y que el técnico en ultrasonido debe poner en manifiesto, pueden ser de diversa índole y responder a una multiplicidad de factores”. (Romero & Proboste, 2013, p.34). Como

anteriormente se mencionaba, las discontinuidades pueden provenir de diferentes fuentes, siendo algunas intrínsecas al tipo de proceso de soldadura empleado y otras comunes a casi todos los procesos; en ocasiones, las discontinuidades son provocadas por la inexperiencia o negligencia del soldador (posición incorrecta del electrodo, mala elección del material de aporte), también a que no se tiene registro del procedimiento para la realización del proceso (intensidad inadecuada, velocidad de desplazamiento elevada). Las discontinuidades en soldadura pueden agruparse en:

Externas:

- Grietas (longitudinales, transversales, cráter)
- Penetración incompleta
- Descolgamientos
- Desalineamientos

Internas:

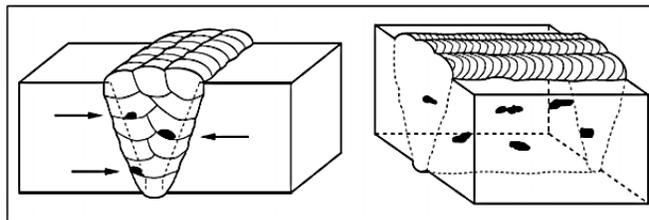
- Grietas (longitudinales y trasversales)
- Penetración incompleta
- Falta de fusión
- Escoria
- Porosidad

5.7.6. Tipos de discontinuidades internas

Las discontinuidades internas se presentan internas al cordón de soldadura realizado. Por otro lado, se considera inclusiones de escoria a las deferencias originadas por materiales sólidos extraños (metálicos y no

metálicos) aprisionados en la masa del metal durante el proceso de soldadura. Tal defecto puede ser observado en la figura 12.

Figura 12. **Inclusiones de escoria**

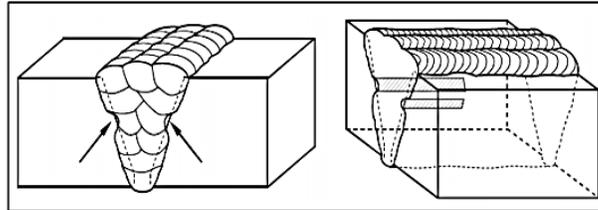


Fuente: ROMERO, B; PROBOSTE, F. (2013) *Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura.*

Las inclusiones de escoria son ocasionadas por el empleo de fundentes consumibles como medio de protección, ya que las escorias atrapadas en el metal depositado durante la solidificación forman depósitos de carbón, óxidos metálicos y silicatos principalmente.

En cuanto a la fusión incompleta, Romero y Proboste (2013) señalan que la fusión incompleta es la falta de fusión que se tiene entre el metal de aporte y el metal base. La fusión incompleta, como se aprecia en la figura 13, son espacios originados entre los elementos a unir, generalmente ocasionados por amperajes inadecuados que producen bajas temperaturas de arco durante el proceso de soldadura.

Figura 13. **Fusión incompleta**



Fuente: ROMERO, B; PROBOSTE, F. (2013). *Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura.*

Dependiendo de su localización, es posible distinguir tres tipos de falta de fusión:

- En la raíz se produce debido a la falta de abertura en la raíz y a inadecuadas temperaturas de soldadura.
- Lateral.
- Entre cordones.

Grietas:

“Es la discontinuidad más crítica en soldadura, debido a características que tienden a la propagación de esta, como lo es la geometría alargada y extremos agudos”. (Romero & Proboste, 2013, p.37).

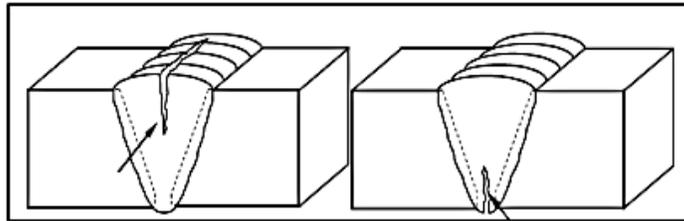
Tipos de grietas:

Los tipos de grietas comúnmente observados en un cordón de soldadura se pueden apreciar en la figura 16, donde se especifica la ubicación de cada una de estas.

- Grietas frías: se originan durante la solidificación del metal a altas temperaturas.
- Grietas calientes: se originan después que el metal se ha solidificado y enfriado a temperatura ambiente.
- Grietas longitudinales: como se aprecia en la figura 14, las grietas son resultado de esfuerzos transversales de contracción o esfuerzos asociados a condiciones de servicio.
- Grietas de garganta: son grietas longitudinales originadas como continuación de grietas internas.
- Grietas de dedo: son grietas alargadas.
- Grietas de cordón: son resultado de la presencia de hidrógeno en la zona de soldadura; presente en el metal base, de aporte en la atmósfera o contaminación superficial.
- Grietas de raíz: son grietas longitudinales ocasionadas por juntas inadecuadas, como aberturas de raíz estas provocan concentraciones de esfuerzos.
- Grietas de cráter: ocasionadas por un llenado incompleto del charco de soldadura fundida al terminar el arco; combinadas a esfuerzos de concentración durante la solidificación dan origen al cráter.

- Grietas en el metal base: son grietas asociadas con elevadores de esfuerzos, los cuales resultan en el agrietamiento una vez que la pieza ha sido puesta en servicio.

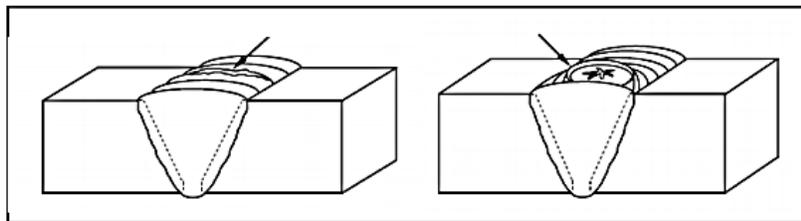
Figura 14. **Grietas longitudinales**



Fuente: ROMERO, B; PROBOSTE, F. (2013). *Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura.*

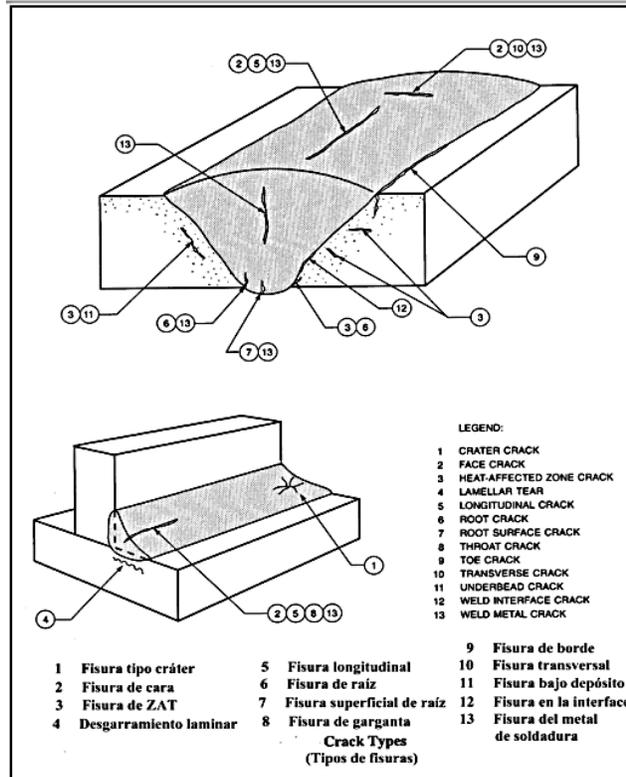
Las grietas transversales son aquellas que surgen en el cordón entre los extremos de la pieza o elemento a unir, como se observa en la ilustración 15.

Figura 15. **Grietas transversales**



Fuente: ROMERO, B; PROBOSTE, F. (2013). *Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura.*

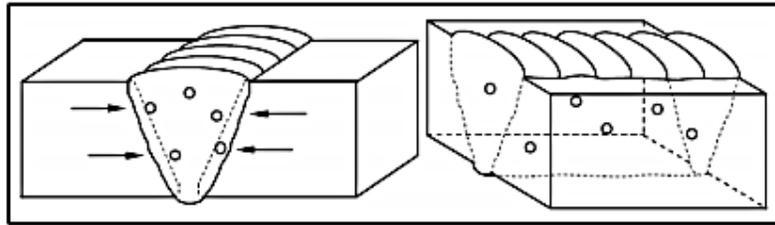
Figura 16. Tipo de grietas características en procesos de soldadura



Fuente: ROMERO, B; PROBOSTE, F. (2013). *Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura.*

En cuanto a la porosidad, como lo indican Romero y Proboste (2013), es una discontinuidad de tipo cavidad, generada por gas atrapado durante la solidificación. Como se observa en la figura 17, simplemente pueden ser huecos o paquetes de gas dentro del metal soldado. La porosidad es normalmente considerada la discontinuidad menos peligrosa. Sin embargo, donde la soldadura debe formar algún límite para contener un gas o líquido la porosidad puede ser considerada más peligrosa.

Figura 17. **Porosidad con distribución uniforme a lo largo de la soldadura**



Fuente: ROMERO, B; PROBOSTE, F. (2013). *Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura.*

5.8. Rayos X

“La radiología industrial es una técnica de ensayos no destructivos que permite la detección de defectos, en piezas, sin necesidad de recurrir a su destrucción” (Cembrero, J.; Ferrer, C.; Pascual, M.; Pérez, M., 2005, p.115). Se fundamenta en los RX, que son radiaciones electromagnéticas de muy corta longitud de onda, capaces de penetrar en cualquier material. Al atravesar el material la radiación incide sobre una placa radiográfica constituida por una emulsión de haluro de plata que releva los posibles defectos.

“La inspección por radiografía industrial detecta discontinuidades microscópicas y variaciones en la estructura interna de un material; la radiografía permite obtener una imagen de la estructura interna de una pieza o componente” (González, 2003, p.176). Durante la exposición, la energía de rayos x es absorbida o atenuada al atravesar el material; esta atenuación es proporcional a la densidad y espesor del material empleado. La radiación que traspasa el objeto es registrada en una placa o papel fotosensible, que posteriormente se revela para obtener la imagen del área inspeccionada. Se debe mantener una distancia prudente entre el inspector y la fuente de rayos X, para evitar posibles exposiciones a la radiación emitida; se debe emplear

también una protección de plomo, acero o concreto entre el individuo y la fuente. Posteriormente la fuente es colocada a una cierta distancia con respecto al objeto y se coloca la película radiográfica del otro lado de este para registrar la radiación, esta radiación provoca la sensibilización de la película radiográfica, que es idéntica al negativo de una fotografía.

El proceso de revelado se realiza en un laboratorio de revelado, las radiografías deben poseer una alta densidad radiográfica y una buena calidad de imagen. La densidad radiográfica de una película es su grado de ennegrecimiento. La radiografía industrial es empleada para la detección de defectos internos, tales como grietas, socavados, penetración incompleta de raíz o falta de fusión. El equipo que se utiliza para este tipo de ensayos no destructivos puede observarse en la ilustración 18. La ventaja de la radiografía industrial radica en su versatilidad, ya que se aplica en todo tipo de materiales y proporciona un registro visual del interior del material inspeccionado.

Figura 18. **Equipo para inspección de rayos X**



Fuente: ZHONGYI. (2015). *Equipo de radiografía para inspección de soldadura*.
<https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-ndt-testing-equipment-x-ray-generator-60355898175.html>.

5.8.1. Limitaciones de la radiografía industrial

- No es recomendable utilizarla en piezas de geometría complicada.
- La pieza de inspección debe tener acceso al menos por dos lados.
- Su empleo requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad.
- El personal debe estar altamente capacitado, calificado y con experiencia.
- Requiere instalaciones especiales, como el área de exposición, equipo de seguridad y cuarto oscuro para el proceso de revelado.
- Las discontinuidades de tipo laminar no pueden ser detectadas por este medio.

5.9. Análisis metalográfico

La Federación de Enseñanza DE CC.OO. de Andalucía (2011), define a la metalurgia como: “la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación, buscando microestructuras, inclusiones, tratamientos térmicos a los que haya sido sometido, micro rechupes, con el fin de determinar si dicho material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado”. (p.1). Como se explica anteriormente, por medio de la metalografía se puede hallar la presencia de material fundido, forjado y laminado en el material a examinar. Al realizar un análisis metalográfico se pueden observar los granos que componen la estructura de un material, tal como se representa en la figura19.

Figura 19. **Granos metalográficos**



Fuente: Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía. (2011). *Granos metalográficos*. <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8732.pdf>.

La herramienta más importante del metalurgista es el microscopio, ya que permite determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tengan gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho del cuidado que se tenga en preparar la muestra.

5.9.1. Tipos de metalografías

La Federación de Enseñanza DE CC.OO. de Andalucía (2011) indica que la metalografía se puede dividir en:

- Metalografía cuantitativa: su objetivo es determinar el tamaño medio de los granos, el porcentaje de material en cada fase, la forma y el tipo de inclusiones no metálicas. Con estos datos es posible identificar cada componente, prever el comportamiento mecánico y el método con el que el material fue procesado.
- Metalografía cualitativa: consiste solo en observar la microestructura, determinándose cuales son los microconstituyentes que la componen. Los microconstituyentes varían de acuerdo con los tratamientos térmicos, tratamientos mecánicos, procesos de fabricación y otros procesos a que el material haya sido sometido.

Como explicó Gomero en el año 2015, el examen micrográfico es una técnica que necesita de una preparación más especial y cuidadosa de la muestra. Se basa en una amplificación superficial por medio de instrumentos ópticos (microscopio) para observar características estructurales del material a examinar. Este examen permite controlar el tratamiento térmico al que haya sido sometido el metal, debido a que pone en evidencia la estructura o los cambios estructurales que ha sufrido debido al tratamiento térmico, como consecuencia de ello es posible deducir las variaciones que experimentan sus propiedades mecánicas.

El metal fundido de la soldadura se solidifica en cuestión de segundos. La fuente de calor y el metal fundido tienen una temperatura considerablemente

superior a la de los hornos de fusión. Como resultado de un enfriamiento rápido del cordón de soldadura, las reacciones químicas del metal fundido y escoria no tienen tiempo para completarse.

6. PROPUESTA DEL ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS DEL GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Acero inoxidable

1.1.1. Definición

1.1.2. División de los aceros inoxidables

1.2. Tuberías

1.2.1. Tipos de tuberías

1.2.2. Usos de las tuberías

1.3. Soldadura

1.4. Soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW)

1.4.1. Ventajas y desventajas del proceso SMAW

1.4.2. Equipo

1.4.3. Polaridades

1.4.4. Factores que influyen en la calidad de la soldadura

1.4.5. Clasificación de los electrodos

1.5. Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW)

1.5.1. Características de la soldadura

1.5.2. Contaminación de la soldadura

1.5.3. Posiciones de soldadura de tubos

- 1.5.4. Varillas de aporte
- 1.5.5. Electrodo de tungsteno
- 1.5.6. Afilado del electrodo de tungsteno
- 1.5.7. Ventajas del proceso GTAW
- 1.5.8. Desventajas del proceso GTAW
- 1.6. Ensayos no destructivos
 - 1.6.1. Tipos de ensayos no destructivos
 - 1.6.2. Clasificación de los END
- 1.7. Ensayo de ultrasonidos
 - 1.7.1. Ventajas
 - 1.7.2. Desventajas
 - 1.7.3. Clasificación de las técnicas por ultrasonidos
 - 1.7.4. Aplicaciones
 - 1.7.5. Discontinuidades detectadas por los ultrasonidos
 - 1.7.6. Tipos de discontinuidades internas
- 1.8. Rayos X
 - 1.8.1. Limitaciones de la radiografía industrial
- 1.9. Análisis metalográfico
 - 1.9.1. Tipos de metalografías
- 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 2.1. Recopilación de la información previa a la investigación
 - 2.2. Compra de materiales consumibles
 - 2.3. Fabricación de soldaduras para la unión de tuberías
 - 2.4. Aplicación de ensayos no destructivos
 - 2.5. Análisis y discusión de resultados
 - 2.6. Propuesta de solución al problema planteado
- 3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4. PROPUESTA PARA EL PROCESO DE SOLDADURA ADECUADO EN
TUBERÍAS DE ACERO INOXIDABLE 304 CÉDULA 40 DE 2" DE
DIÁMETRO

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

7. METODOLOGÍA

7.1. Diseño

La investigación requiere de datos importantes como: la cantidad de fallas ocurridas en cada proceso de soldadura, tipos de fallas y discontinuidades observadas durante el desarrollo de la investigación son algunas de ellas. Determinar qué proceso de soldadura genera una mayor cantidad de calor y cuáles son los costos para desarrollar cada método de soldadura incluye costos y materiales para llevar a cabo las técnicas de ensayos no destructivos. Esto para determinar el proceso de soldadura adecuado en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro. También sirve para tener un marco de referencia respecto a futuras soldaduras a realizar en este tipo de elementos. De manera que los datos serán obtenidos mediante un proceso observacional, siendo una investigación de carácter experimental.

7.2. Tipo de estudio

El tipo de estudio a realizar durante el desarrollo de la investigación será descriptivo, ya que permitirá determinar fallas y discontinuidades presentes en los cordones de soldadura. El investigador observará cuáles son los efectos de aplicar diferentes procesos de soldadura en la unión de tuberías de acero inoxidable.

La finalidad de la investigación es determinar el proceso adecuado para desarrollar soldaduras en tuberías de acero inoxidable cédula 40; así también, determinar la razón de las fallas y discontinuidades que se presentan en

cordones de soldadura. El alcance temporal tiene características de ser una investigación transversal, es decir, que será desarrollada en un tiempo específico, excluyendo futuras actualizaciones. Dicha investigación debe realizarse de esa manera debido a que el sector evoluciona constantemente.

7.3. Alcance

Para llevar a cabo la investigación se debe tener en cuenta la disponibilidad para encontrar la solución al problema planteado; así también, el tiempo necesario para desarrollar cada una de las etapas y ser tenaz para superar los problemas que se puedan surgir durante el proceso de investigación.

En este proceso es importante identificar los materiales que se utilizarán para llevar a cabo la investigación. También se desarrollará un criterio para determinar el proceso de soldadura adecuado en tuberías de acero inoxidable. Además, se debe verificar si se cuenta con guías para determinar las fallas presentadas con anterioridad.

En caso de no contar con la información indicada en el párrafo anterior, se diseñará un sistema para la recolección de datos, que permita la recopilación de fallas y discontinuidades, lo que permitirá saber qué proceso de soldadura es el adecuado para la unión de tubería de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2” de diámetro. El procedimiento para la preparación de las juntas a soldar será de conformidad con la norma AWS D1.6. y se dejará registro de lo realizado para futuras consultas.

El proceso de soldadura adecuado para la unión de tuberías de acero inoxidable cédula 40 se determinará por medio del análisis de las fallas y

discontinuidades presentadas, obteniendo así el conocimiento acerca del origen de las fallas y su repercusión en el desarrollo de un proyecto de instalaciones mecánicas.

Se realizará una tabla comparativa en donde se indiquen las fallas y discontinuidades detectadas en cada técnica de ensayo no destructivo, según sea el proceso de soldadura empleado. Se busca reducir el número de fallas y el tiempo para la selección del proceso de soldadura, esto por medio de una lista que relacione las fallas y el proceso de soldadura evaluado, observando qué técnica de ensayo no destructivo se aplicó para la determinación de dicha falla. Se dejará una guía para beneficio de la empresa de metalmecánica, para la determinación del proceso de soldadura adecuado.

7.4. Variables independientes

- Ambiente de trabajo
- Materiales consumibles
- Tipos de electrodos
- Corriente eléctrica aplicada en cada proceso de soldadura

7.5. Variables dependientes

- Fallas presentadas
- Costos en cada proceso de soldadura
- Número de fallas

7.6. Indicadores

Los indicadores en los cuales se basará la toma de decisiones para la elección del proceso de soldadura adecuado son:

- Número de fallas: saber qué cantidad de fallas resultantes fueron obtenidas después de realizados los ensayos no destructivos.
- Clasificación de las fallas: determinar la clasificación de las fallas.
- Clasificación de proceso más costoso: determinar el proceso de soldadura más costoso.
- Tiempo para realización de cada proceso: cuánto tiempo se emplea en la preparación, proceso de unión, generando costos imprevistos en refacciones y en horas hombre.
- Clasificación de los ensayos no destructivos: determinar qué fallas se presentaron por cada proceso de soldadura y si en realidad fue efectiva su aplicación.

7.7. Fases

La investigación será realizada por los pasos que se presentan:

Etapa 1: selección del proceso de soldadura y los ensayos no destructivos a realizar.

1) Se conocerán qué procesos de soldadura se investigarán y se determinará cuáles serán los ensayos no destructivos a realizar.

Revisión documental:

Etapa 2: recopilación de la información.

- 1) Se necesita extraer información acerca de los procesos de soldadura que serán aplicados y de los ensayos no destructivos elegidos para llevar a cabo la investigación.
- 2) Consultar y entrevistar con el personal de fabricación sobre las consecuencias que representa el tener fallas en los cordones de soldadura.
- 3) Empezar el registro de datos sobre el historial o bitácora de mantenimiento.

Plan de muestreo:

Etapa 3: aplicación de ensayos no destructivos a muestras de tubería soldadas.

- 1) Elaboración de tabla con defectos localizados en cada ensayo no destructivo por cada proceso de soldadura.
- 2) Estimación de costos de fabricación plasmados en una hoja para determinar cuáles fueron los costos por cada proceso.

Diseño de instrumentos de recolección de información:

Etapa 4: análisis de los ensayos no destructivos para determinar qué proceso de soldadura es el adecuado para la unión de tuberías de acero inoxidable 304 cedula 40 de 2”.

Trabajo de campo, trabajo de laboratorio, con el propósito de ensayar la solución propuesta al problema planteado.

7.8. Resultados esperados

Los resultados que se esperan luego de realizada la investigación corresponden a:

- Disminución del número de fallas o defectos en las soldaduras realizadas.
- Conocimiento acerca de los costos en los cuales se incurre al realizar cada proceso de soldadura.
- Noción sobre la aplicación de ensayos no destructivos a cordones de soldadura fabricados.
- Comprensión acerca de los efectos que se tienen al no utilizar un material de aporte adecuado según el material base.
- Los resultados obtenidos deben evidenciar en qué medida se resolvió el problema, mediante la solución de la técnica ensayada.

8. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se necesita un método para la tabulación de los datos que serán recolectados para el análisis y solución del problema a resolver. Para el análisis de la información recolectada durante el estudio se utilizarán dos técnicas de análisis de datos.

La estadística descriptiva se encarga de la recolección, organización, presentación y análisis de datos de una población. El método de análisis de datos se pondrá en práctica mediante estadística descriptiva, utilizando las medidas de tendencia central.

Una población es un conjunto definido de todos los individuos en que se observa ciertas características. Al número de integrantes de la población se le llama tamaño de población y se representa con la letra N .

Los datos cualitativos se obtienen al calificar la característica en cuestión como sexo o estado civil, y los datos cuantitativos son valores obtenidos al medir peso, estatura, temperatura. Además, es útil considerar estos aspectos:

- Moda: para identificar qué proceso de soldadura contiene mayores defectos o fallas.
- Media aritmética: para saber cuánto se lleva en promedio para la fabricación de soldadura.
- Sumatoria: para saber cuánto dinero o recurso se invierte en total en cada proceso de soldadura.

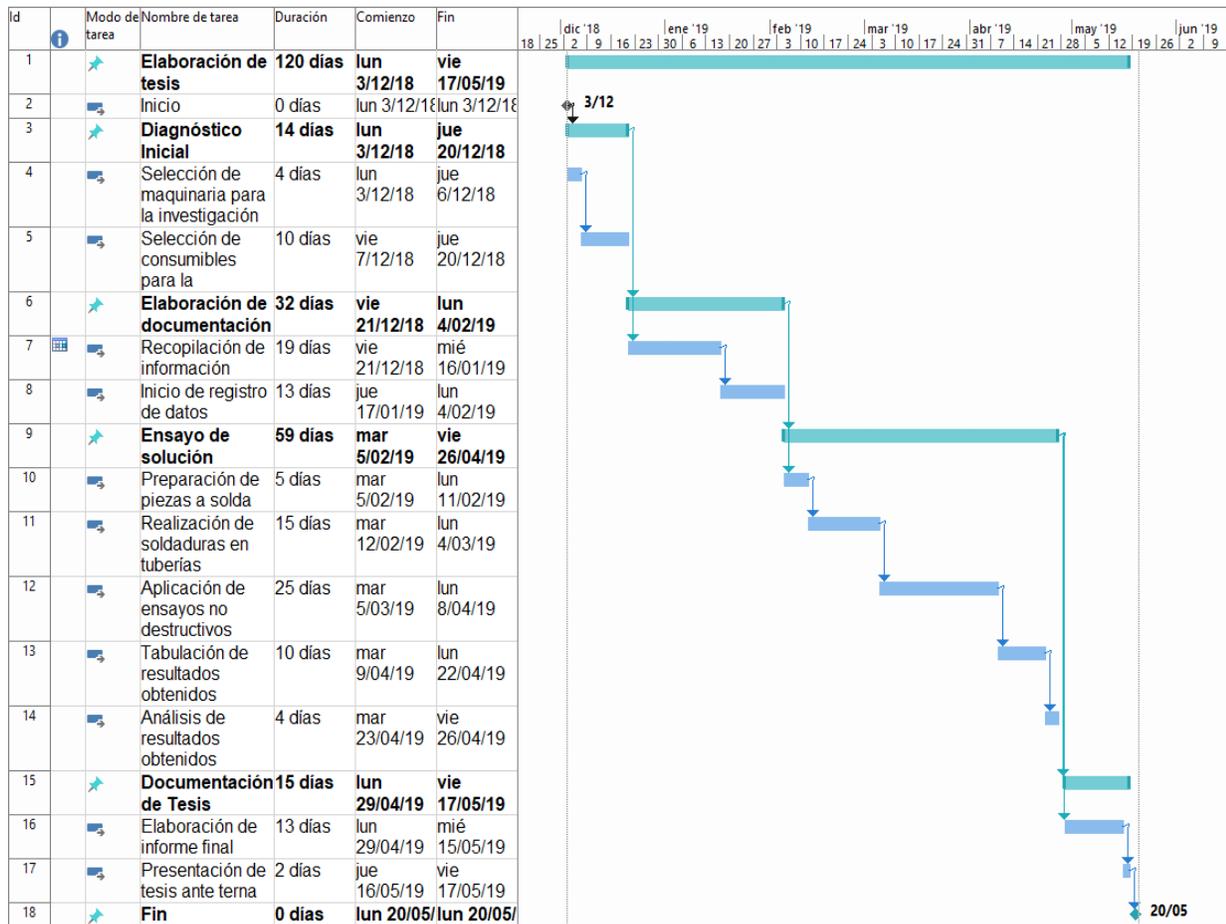
Se utilizará un software informático para la organización y agrupación de los datos recolectados de las fallas y discontinuidades presentadas en cada proceso de soldadura, adjuntando las fallas obtenidas a partir de la aplicación de cada ensayo no destructivo, tabulando tiempos para la realización de cada uno. Excel será el utilizado en este proyecto, pues cumple con todas las características requeridas. Este software facilitará el ordenamiento, tabulación y manejo de la información para la gestión de la información. Estas son las fases o etapas en las que se utiliza:

- Fase 1: recopilación de la información necesaria para llevar a cabo la investigación.
- Fase 2: tener el equipo adecuado y emplear las condiciones con las cuales se evaluará el proceso de soldadura ayudará a una mejor recolección de datos.
- Fase 3: con los datos ya ordenados y tomando en cuenta los más relevantes se planteará el proceso de soldadura adecuado.

Con la información ya ordenada y agrupada queda pendiente el análisis de la misma, para lo cual se utilizará estadística descriptiva, para localizar las tendencias y organizar los factores que se encuentran implícitos en la investigación. Los factores serán recopilados por medio del sistema de gestión del mantenimiento.

9. CRONOGRAMA

Figura 20. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

10. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Se realizará un análisis sobre la factibilidad de la investigación, por lo que se establecerán 2 tipos de factibilidad, una operativa y una económica, las cuales se describen a continuación:

10.1. Factibilidad operativa

Es el recurso disponible para el desarrollo y elaboración de la investigación, estableciendo el proceso adecuado para la unión de tuberías de acero inoxidable 304 cedula 40 de 2" de diámetro.

- Se dispondrá de un área específica en el taller para llevar a cabo los procesos de soldadura.
- Las soldaduras serán elaboradas por personal técnico calificado en esa área, disminuyendo así la posibilidad de provocar fallas en los cordones de soldadura.
- Se emplearán dos máquinas para soldar, una para el proceso SMAW y otra para el proceso GTAW, respectivamente.
- Los equipos e instrumentos que serán utilizados para llevar a cabo los ensayos no destructivos de ultrasonidos, rayos x y análisis metalográfico serán proporcionados por el asesor de la investigación.

- Las herramientas eléctricas y materiales consumibles a utilizar serán amoladoras radiales de 4 1/2 pulgadas, limas para acero inoxidable, pasta decapante, electrodos para proceso SMAW, varillas de aporte para proceso GTAW, mopas, discos de lija, discos abrasivos para corte de acero inoxidable, reguladores de nitrógeno y argón.

10.2. Factibilidad económica

Tabla III. Factibilidad económica

DESCRIPCIÓN DEL RECURSO	CANTIDAD	TOTAL
Técnico encargado de realizar las uniones en las tuberías de acero inoxidable	1	Q. 800,00
Equipo para soldadura GTAW	1	Q. 25,00
Equipo para soldadura SMAW	1	Q. 25,00
Ensayos no destructivos a 12 soldaduras realizadas	1	Q. 2,250.00
Tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40, tramo de 30 pies.	1	Q. 1 200,00
1 libra de electrodos para soldadura SMAW	1	Q 50,00
Tungstenos punto rojo para acero inoxidable	5	Q 60,00
Cepillo para acero inoxidable con mango plástico	1	Q 25,00
Discos de corte para acero inoxidable de 4 ½	15	Q 150,00
Material de aporte para soldadura GTAW en rollo	1	Q 70,00
Decapante para acabado final de ambas soldaduras en bote	1	Q 250,00

Continuación de tabla III.

Discos de lija para acero inoxidable de 4 ½	3	Q 75,00
Tanque de argón para soldadura GTAW	1	Q 250,00
Tanque de nitrógeno para soldadura GTAW	1	Q 350,00
Tinta para impresora a color y blanco y negro	2	Q 300,00
Paquete de hoja bond con motivos de impresión	1	Q 40,00
Asesoría para llevar a cabo la investigación	1	Q 2 700,00
Total		Q. 8 620,00

Fuente: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, S.; Serna, C.; Aristizábal, S. (2015). Transformaciones microestructurales en soldaduras disímiles de acero inoxidable austenítico con acero inoxidable ferrítico. *Soldagem & Inspeção*, 20(1).
2. Alvarado, P.; Flores, N. (2006). Evaluación de procedimientos para soldabilidad de los aceros inoxidables. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad de Magallanes, Chile.
3. Arévalo, J. (2013). Análisis de soldabilidad de aceros inoxidables con aceros de medio y bajo carbón por SMAW. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
4. Brito, L. (2004). Caracterización de defectos inducidos en patrones de acero AISI 304 a través de radiografía, TOFD y ultrasonido. Tesis de grado, Ingeniería de Materiales, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
5. Celada, E. (2015). Ensayos de soldadura al arco con electrodo revestido en acero inoxidable austenítico AISI 304. Tesis de postgrado, Ingeniería de Mantenimiento, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
6. Cembrero, J.; Ferrer, C.; Pascual, M.; Pérez, M. (2005). *Ciencia y tecnología de materiales*. Madrid (España), Pearson Prentice Hall.

7. Chaverri, O.; Conejo, M. (2016). Radiografía industrial: comparación entre el método tradicional y digital empleando rayos X. *Tecnología en Marcha*, 30(3).
8. Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía. (2011). *Metalografía*. Revista Digital para Profesionales de la Enseñanza. ISSN: 1989-4023.
9. Gomero, J. (2015). *Metalografía de cordón de soldadura*. Tesis de grado, Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
10. González, A. (1995). *Aplicación de los rayos X en la industria como prueba no destructiva*. Tesis de postgrado, Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Diseño Mecánico, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
11. González, J. (2003). *Metalurgia mecánica*. México, Editorial Limusa, S. A.
12. Ibarra, M.; Núñez, E.; Huerta, J. (2010). *Manual de aceros inoxidables para soldadores*. Chile, 2M Impresores Ltda.
13. Intertek Group PLC. (2018). *Ensayos no destructivos por ultrasonidos*. Recuperado de: [http://www.intertek.es/uploadedFiles/wwwintertekes/Services/Industrial/Intertek_Brochure_END_V2\(1\).pdf](http://www.intertek.es/uploadedFiles/wwwintertekes/Services/Industrial/Intertek_Brochure_END_V2(1).pdf).
14. Jeffus, L. (2010). *Manual de soldadura GTAW (TIG)*. España, Paraninfo.

15. Jeffus, L. (2009). Soldadura, principios y aplicaciones. España, Paraninfo.
16. Kalpakjian, S.; Schmid, S. (2002). Manufactura, ingeniería y tecnología. México, Pearson Educación.
17. Lincoln Electric. (2017). Catálogo general, soluciones en soldadura y corte. México D. F.
18. Naula, W. (2014) Análisis de variación de electrodos en un proceso de soldadura SMAW en acero inoxidable AISI 304 austenítico y su incidencia en las propiedades mecánicas. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
19. Orozco, F.; López, C. (2013). Soldadura en atmósfera protegida. España, Paraninfo.
20. Pajuelo, J. (2009). Evaluación de los procesos de soldadura TIG con y sin material de aporte en planchas de acero estructural. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.
21. Pazos, N. (2006). Tecnología de los metales y procesos de manufactura. Venezuela, Universidad Católica Andrés Bello.
22. Porras, G.; Franco, L.; Gómez, O.; Quinto, D. (2005). Identificación metalográfica de fases en una junta soldada de acero estructural micro aleado y su influencia en el mecanismo de fractura. Revista Metalurgia de Madrid, 3(1).

23. QuiniNet. (2001). Las tuberías de acero inoxidable y su aplicación en la industria. Recuperado de: <https://www.quiminet.com/articulos/las-tuberias-de-acero-inoxidable-y-su-aplicacion-en-la-industria-58070.htm>. [Consulta: 15 de marzo de 2018].
24. Revista Digital para Profesionales de la Enseñanza. (2011). Ensayos no destructivos en soldadura. Federación de Enseñanza de Andalucía, España.
25. Revista Digital para Profesionales de la Enseñanza. (2011). Metalografía. Federación de Enseñanza de Andalucía, España.
26. Romero, B.; Proboste, F. (2013). Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío Bío, Chile.
27. Soldexa. (2017). Manual de soldadura y catálogo de productos. OERLIKON, Perú.
28. Soria, E. (2004). Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, USAC. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
29. Villavicencio, J. (2010). Relación, microestructura/propiedad en la soldadura GTAW entre aceros inoxidables y aceros al carbono. Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

APÉNDICE

Apéndice 1. Matriz de coherencia

Problema	Objetivo	Metodología	Conclusión
<p>General: falta de conocimientos acerca de técnicas para la evaluación de soldaduras y su importancia en los procesos de soldadura.</p>	<p>General: establecer si los ensayos no destructivos son técnicas adecuadas para la selección del proceso de soldadura (SMAW o GTAW) apropiado para la unión de tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro.</p>	<p>Aplicar los ensayos no destructivos de manera adecuada para obtener resultados confiables.</p>	<p>La correcta aplicación de los ensayos no destructivos permitirá determinar el proceso de soldadura adecuado.</p>
<p>Específicos: Fallas o discontinuidades que no se pueden detectar por medio de técnicas como observación directa.</p> <p>Aumento en los costos por fabricación de soldaduras.</p> <p>Inicio de corrosión o deterioro del material base, debilitando la unión a realizar.</p>	<p>Identificar el proceso de soldadura que produce menores defectos según el análisis de resultados obtenido a partir de la aplicación de las técnicas de ensayos no destructivos</p> <p>Determinar el proceso de soldadura que conlleva mayores costos para su fabricación en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro.</p> <p>Describir cuáles son los resultados de fabricar una soldadura con electrodo o varilla de aporte inadecuado en tuberías de acero inoxidable 304 cédula 40 de 2" de diámetro</p>	<p>A partir del análisis de resultados se extraerá una lista que permita identificar los defectos según el proceso de soldadura realizado.</p> <p>Por medio del software MS Excel poder llevar a cabo un análisis de costos por cada proceso de soldadura realizado.</p> <p>Realizar una lista con los defectos y fallas encontrados debido a la inadecuada elección del material de aporte.</p>	<p>Aumentar la probabilidad de obtener soldaduras de calidad por medio del análisis de los END.</p> <p>Determinar el proceso de soldadura conveniente, según los costos para su realización.</p> <p>La elección del material de aporte adecuado influye positiva o negativamente en las soldaduras realizadas.</p>

Fuente: elaboración propia.

