

EVALUACIÓN A PARTIR DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO Y
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL DE GRIETAS Y FALTAS DE FUSIÓN INDUCIDAS
EN EL PROCESO DE SOLDADURA DE MATERIALES DISÍMILES

SANTIAGO TIQUE VILLAMIL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA
BUCARAMANGA
2019

EVALUACIÓN A PARTIR DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO Y
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL DE GRIETAS Y FALTAS DE FUSIÓN INDUCIDAS
EN EL PROCESO DE SOLDADURA DE MATERIALES DISÍMILES

SANTIAGO TIQUE VILLAMIL

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
METALURGICO

DIRECTOR

CARLOS ANDRES GALAN PINILLA

MAGISTER EN INGENIERIA DE MATERIALES

CODIRECTOR

ANA MARIA PEREZ CEBALLOS

DOCTORA EN INGENIERIA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOQUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA

BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres, Flor de María Villamil y Libardo Tique quienes de manera incondicional me apoyaron con su amor, inspiración y comprensión en la realización de este logro y de todos mis proyectos personales, a mis hermanas, Maricela y Vanessa, quienes con su experiencia me guiaron con buen consejo, a mí sobrino, David Felipe, quién con su alegría de niño me motivó a seguir, a Nathalia Gómez quién estuvo a mi lado en los momentos más difíciles brindándome seguridad y apoyo emocional.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de proyecto Carlos Galán Pinilla, por la oportunidad de permitirme trabajar con él, guiándome durante toda la realización de la investigación.

A mi codirectora de proyecto Ana María Pérez Ceballos quién con paciencia y esmero me guío en la realización del proyecto.

A los familiares que me creyeron en mí.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de materiales.

A los profesores de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales quienes me formaron académica y personalmente.

A los técnicos de laboratorio: Oscar, Javier, Mario, Sergio, Domingo y Ambrosio, quienes contribuyeron en mi formación con su conocimiento y amistad durante mi formación en la universidad.

A todas las personas que contribuyeron en la realización de este proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	15
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GENERAL	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	18
3.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS EN LA EVALUACIÓN DE PLACAS.....	18
3.2. ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES (PAUT)	18
3.3. SOLDADURA.....	20
3.4. DEFECTOLOGÍA EN PLACAS SOLDADAS	20
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	22
4.1. ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	22
4.2. ETAPA 2: DISEÑO DE LAS PROBETAS	23
4.2.1.Actividad 1: Elaboración de los procedimientos WPS	23
4.3. ETAPA 3: FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DISEÑADAS.	23
4.4. ETAPA 4: APLICACIÓN DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	25
4.4.1.Actividad 1: Capacitación en el manejo de equipos	25
4.4.2.Inspección	Visual
.....	26
4.4.3.Radiografía	Industrial
.....	26

4.4.4. Aplicación de Ultrasonido Por Arreglo de Fases	27
4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	27
4.6. ELABORACIÓN DE INFORME FINAL.....	27
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
5.1. ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA, WPS, PARA LAS TRES PROBETAS SOLDADAS	28
5.2. RESULTADOS DE INSPECCIÓN MEDIANTE DE ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES Y RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL PARA LAS TRES PROBETAS.	30
5.3. INSPECCIÓN DE SOLDADURAS POR ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES Y RADIOGRAFIA INDUSTRIAL.....	31
5.4. EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD Y FACILIDAD DE INSPECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES Y RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL.....	35
6. CONCLUSIONES	37
7. RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFÍA.....	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes técnicas de ensayos no destructivos.....	18
Tabla 2. Defectología en placas soldadas.....	21
Tabla 3. Parámetros de Inspección visual.....	26
Tabla 4. Parámetros de Radiografía Industrial.....	26
Tabla 5. Parámetros de Ultrasonido por arreglo de fases.....	27
Tabla 6. WPS 1: Especificaciones para fabricar la probeta 1.....	28
Tabla 7. Aspecto superficial de las tres probetas soldadas.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A) Vista B-Scan donde se denotan la morfología de los ecos, y B) vista C-San donde se ve la ubicación de la indicación.....	19
Figura 2. Vista S-scan como ejemplo para dimensionar.....	20
Figura 3. Esquema de la metodología a realizar para el desarrollo del proyecto....	22
Figura 4. Diagrama de <i>Schaffler</i>	24
Figura 5. Resultados obtenidos en la probeta 1. A y B) Indicaciones detectadas al acoplar el transductor sobre el acero al carbono y el acero inoxidable respectivamente. C) Película radiográfica obtenida de la probeta 1.....	32
Figura 6. Resultados obtenidos en la probeta 2. A y B) Indicaciones detectadas al acoplar el transductor sobre el acero al carbono y el acero inoxidable respectivamente. C) Película radiográfica obtenida de la probeta 2.....	33
Figura 7. Resultados obtenidos en la probeta 3. A y B) Indicaciones detectadas al acoplar el transductor sobre el acero al carbono y el acero inoxidable respectivamente. C) Película radiográfica obtenida de la probeta 3.....	34

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. WPS 2 para la probeta 2.....	41
Anexo B. WPS 3 para la probeta 3.....	43
Anexo C. Vista S-scan de Ultrasonido Por Arreglo de Fases.....	45
Anexo D. Dimensiones de indicaciones encontradas por Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial para la probeta 1.....	46
Anexo E. Dimensiones de indicaciones encontradas por Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial para la probeta 2.....	47
Anexo F. Dimensiones de indicaciones encontradas por Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial para la probeta 3.....	48
Anexo G. Indicaciones en la raíz de la probeta 1.....	49

RESUMEN EN ESPAÑOL

TITULO: EVALUACIÓN A PARTIR DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO Y RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL DE GRIETAS Y FALTAS DE FUSION INDUCIDAS EN EL PROCESO DE SOLDADURA DE MATERIALES DISIMILES*

AUTOR: SANTIAGO TIQUE**

PALABRAS CLAVE: *Ensayos No Destructivos, Radiografía Industrial, Ultrasonido.*

DESCRIPCIÓN:

En Colombia actualmente se construyen y operan múltiples estructuras metálicas, presentes en industrias como la del petróleo en estructuras para refinería y procesos de hidrocarburos, en la industria civil para la construcción de puentes metálicos y, en la industria química para la fabricación de estructuras de procesamiento y en plantas de generación de energía, entre otras. En todas estas aplicaciones, para el ensamble se usan procesos de unión por medio de soldadura.

Por el impacto socioeconómico que representan estas estructuras metálicas, se realizan continuamente soldaduras entre materiales disímiles, este tipo de unión tiene características combinadas que permiten el mejoramiento de las propiedades mecánicas y químicas de la junta soldada, lo que redundará en una mayor seguridad del componente ensamblado. Las uniones disímiles se dan generalmente entre aceros al carbono y aceros inoxidable.

Debido a lo anterior, los Ensayos No Destructivos, END, son una alternativa que permiten evaluar oportunamente la integridad de estas uniones sin afectar ninguna de sus propiedades. En este sentido, existen diferentes técnicas que deben o pueden ser aplicadas, estas presentan sensibilidad y facilidad de aplicación diferente, adicionalmente, se han reportado complicaciones y limitaciones a la hora de dimensionar apropiadamente las discontinuidades en este tipo de soldaduras.

Con el fin de evaluar las técnicas de inspección avanzada de ultrasonido por arreglo de fases (Phased Array) y radiografía industrial, en el presente proyecto se diseñaron y fabricaron tres probetas con defectos inducidos durante el proceso de soldadura en materiales disímiles. Seguidamente, se aplicaron los END mencionados y se analizaron los resultados comparando la facilidad y sensibilidad de detección de las discontinuidades inducidas, al igual que la rapidez del ensayo con lo que se pudo evidenciar que el Ultrasonido por arreglo de fases presenta mayor sensibilidad y menor facilidad de ejecución con respecto a la Radiografía Industrial.¹

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla, Magíster en Ingeniería de Materiales.

RESUMEN EN INGLES

TEST FROM THE ULTRASOUND AND RADIOGRAPHY INDUSTRIAL TECHNIQUES FOR CRACKS AND MERGE FAILURES DUE TO MELDING PROCESS OF DISSIMILAR MATERIALS*

AUTHOR: SANTIAGO TIQUE**

KEY WORDS: Nondestructive testing, Industrial radiography, ultrasound.

DESCRIPTION:

Currently, Colombia works and builds numerous metallic structures considered in industries such as: oil industry, refining and fossil fuels industry, engineering industry, chemical engineering for processing structure and for power generation on plants; among others. In all the implementations mentioned above there are found joining processes for assembly through melding process.

Thanks to the socioeconomic impact of the metallic structures in the development and security, it is carried out constantly melding with dissimilar materials, because of its combined features to the improvement of its mechanical and chemical properties that help to provide assurance in the assembling process.

During the manufacturing and service of these kind of joints, it could occur flaws such as: cracking, deformities, fusion failures, undercuts, failure to sink into ground, rusting, among others. On these metallic structures, the flaws are undesirable; nevertheless, it could take place and they have been reported to work on them.

As a result of the processes mentioned above, the non-destructive trials are an alternative that allow to check on time the reliability of these joints without disturbing any of its properties. In this respect, there are different techniques that could or not be applied, these could present sensitivity and ease of use, which has reported issues and limitations now of calculating discontinuities on this kind of melding. With the aim of testing advanced ultrasound inspection techniques through phased array and industrial radiography, in the current project; it was layout and built three test tubes with induced flaws during the melding process in dissimilar materials. Afterward, it was implemented the non-destructive trials. The results were analyzed contrasting the ease and sensitivity detection of the induced discontinuities.²

² *Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla, Magíster en Ingeniería de Materiales.

INTRODUCCIÓN

Las uniones disímiles entre acero al carbono y acero inoxidable son ampliamente utilizadas en diferentes industrias en las que se busca una combinación de propiedades mecánicas que generen una protección al ataque corrosivo. Generalmente estas uniones disímiles se realizan mediante soldadura con electrodo de Tungsteno y material de aporte en forma de varilla, este material de aporte tiene una composición similar al material base inoxidable.

Estas soldaduras disímiles, como en todos los procesos de soldadura, presentan indicaciones que son difíciles de detectar con métodos de ensayos no destructivos como el Ultrasonido pues al tratarse de materiales diferentes, las señales al encontrarse con medios anisotrópicos presentan irregularidades en su detección, por lo que se debe palpar por cada material base e ir comparando lo evidenciado para tener una interpretación precisa; otro ensayo no destructivo de alta sensibilidad y precisión en detección de indicaciones es la Radiografía Industrial, ya que da información en escala muy cerca a la real pudiendo así ver en una película radiográfica la imagen de los defectos y su ubicación además de su longitud, pero no su profundidad.

En el presente proyecto se fabricaron tres probetas disímiles en forma de placas o chapas metálicas y se inspeccionaron mediante los ensayos no destructivos de Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial, determinando así cual presenta mayor sensibilidad y facilidad de ejecución en la caracterización de defectos inducidos simulando condiciones reales.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad las uniones disímiles son utilizadas ampliamente en la industria química, industria petroquímica, en plantas de energía nuclear, de generación de electricidad y en estructuras metálicas, entre otras, con la finalidad de obtener mejores propiedades mecánicas y mejor resistencia al ataque corrosivo [1].

Durante fabricación y servicio de estas uniones se pueden generar discontinuidades como porosidad, que se da por la captación de gas durante la solidificación; faltas de fusión; que se da por la mala técnica en la ejecución de la soldadura; grietas que son el resultado de esfuerzos localizados que exceden el esfuerzo último del material y la corrosión, entre otras. Ante esto, surge la necesidad de evaluar la calidad de estas uniones, empleando en este caso los Ensayos No Destructivos (END), que permiten inspeccionar estas soldaduras, obteniendo información que facilita determinar si la soldadura cumple o no los requisitos de fabricación bajo criterios de aceptación emitidos en códigos o normas como la AWS o ASME. Dentro de estos ensayos están el Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial, que son ensayos con alta sensibilidad, alcance y precisión para la detección y dimensionamiento de discontinuidades [2].

Sin embargo, en la inspección por ultrasonido de las soldaduras disímiles se han evidenciado problemáticas en detección y dimensionamiento de las indicaciones por alteraciones como: la atenuación del haz debido a las propiedades anisotrópicas del material, que dificulta la ejecución del ensayo, este factor ha sido estudiado por diversos autores [3] los cuales han aportado resultados parciales importantes sobre el problema, por ejemplo, el efecto de la variación microestructural sobre la atenuación, divergencia y cambio de velocidad de la onda ultrasónica, lo cual puede afectar la amplitud de las señales [4].

Por lo anterior, surge la pregunta de investigación: ¿cuál ensayo entre Radiografía Industrial y Ultrasonido presenta mayor sensibilidad y facilidad de detección de defectos como las grietas y faltas de fusión en soldaduras disímiles?

Teniendo en cuenta lo anterior, para el presente proyecto se diseñaron y fabricaron tres probetas unidas mediante soldaduras disímiles con defectología inducida por un soldador certificado teniendo en cuenta WPS (*Welding procedure specification*) en la generación de los defectos, variando parámetros de operación como amperaje voltaje, velocidad de avance entre otros para la evaluación mediante Ultrasonido por Arreglos de Fases y Radiografía Industrial. Los resultados obtenidos se clasificaron para comparar la facilidad y sensibilidad de los ensayos involucrados en la caracterización de los defectos evidenciados.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GENERAL

Evaluar a partir de las técnicas de ultrasonido y radiografía industrial grietas y faltas de fusión inducidas durante el proceso de soldadura de materiales disimiles.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fabricar probetas soldadas con juntas disimiles que tengan faltas de fusión y grietas inducidas durante el proceso de soldadura.
- Evaluar mediante técnicas de Ensayos No Destructivos de Ultrasonido y Radiografía Industrial los defectos inducidos en las probetas fabricadas.
- Comparar la sensibilidad y facilidad en la caracterización de los defectos con los ensayos no destructivos empleados para evaluar las probetas fabricadas.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS EN LA EVALUACIÓN DE PLACAS

A continuación, se presenta la tabla 1 con las características más relevantes de los Ensayos no destructivos (END), convencionales [5].

Tabla 1. Diferentes técnicas de ensayos no destructivos.

END	Principio de funcionamiento	Discontinuidades que detecta	Aplicación
Inspección Visual	Se basa en la visión humana y su alcance dentro del espectro electromagnético.	Discontinuidades superficiales, grietas, faltas de fusión poros grandes, entre otras.	Todos los materiales excepto los recubiertos.
Tintas penetrantes	Se basa en el aprovechamiento de la tensión superficial en tintas especialmente hechas para generar un contraste con el revelador.	Discontinuidades superficiales y subsuperficiales, poros, grietas, faltas de fusión, faltas de penetración entre otras.	Todos los materiales exceptos los materiales con superficie rugosa o porosa, o con recubrimiento.
Partículas Magnéticas	Se basa en el magnetismo, generando campos magnéticos alrededor de discontinuidades.	Discontinuidades superficiales y subsuperficiales, grietas finas, marcas de desgaste, porosidades, faltas de fusión entre otras.	Solo en materiales ferromagnéticos
Radiografía Industrial	Se basa en la radiación, a partir de átomos inestables, (isótopos), o tubos de aceleración de electrones se genera energía que irradiada al material, penetra su interior mostrando las diferentes densidades en contraste evidenciando discontinuidades.	Discontinuidades internas y externas, poros internos, faltas de fusión internos, inclusiones, grietas, socavaduras, faltas de fusión, falta de penetración entre otras.	Todos los materiales
Ultrasonido	Se basa en la conversión de señales acústicas de alta frecuencia en señales eléctricas, reflejando ecos para caracterizar indicaciones	Discontinuidades internas y externas, porosidades, faltas de fusión, faltas de penetración, grietas, socavaduras, entre otras.	Todo tipo de material con superficie limpia.

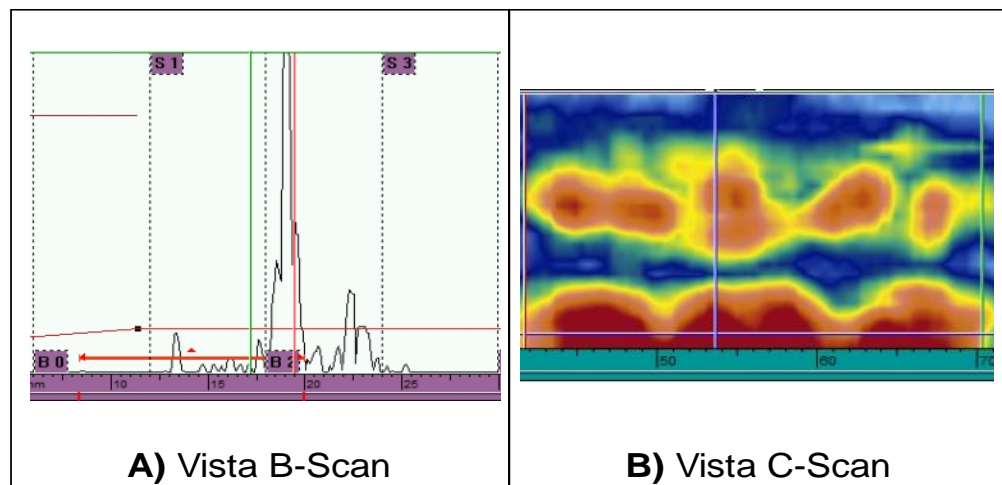
3.2. ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES (PAUT)

El ultrasonido por arreglo de fases (PAUT) y el ultrasonido convencional tienen el mismo principio de funcionamiento, la diferencia está en el tipo de palpador que utiliza el PAUT. El Ultrasonido convencional utiliza un palpador monocristal con un solo diámetro fijo y ángulo que depende de la zapata a la que se acople, el PAUT utiliza de 16 a 256 cristales piezoeléctricos, permitiendo diferentes configuraciones

para generar un rango de ángulos en la inspección con diferentes vistas de la indicación, (*A-scan*, *B-scan*, *D-scan*) [6].

Para dimensionar las indicaciones detectadas se utilizó la técnica de la caída de los 6 decibeles según la norma ASTM E2700, *Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays*, como se muestra en el siguiente ejemplo:

Figura 1. A) Vista B-Scan donde se denotan la morfología de los ecos, y B) vista C-San donde se ve la ubicación de la indicación

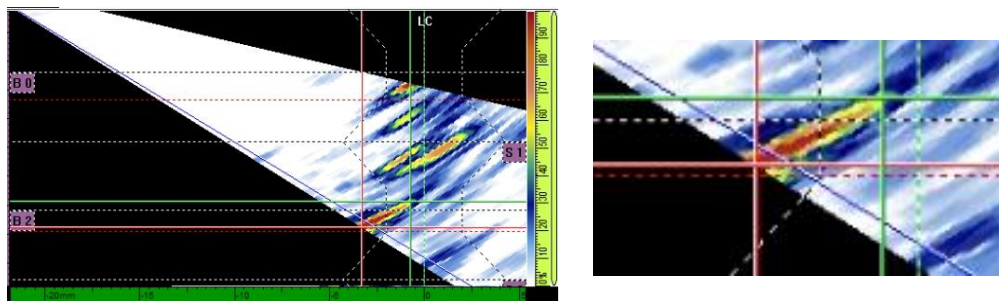


En el software OmniscanPC 4.3, con la ayuda de un cursor se recorre el largo de la indicación en la vista C-Scan y se determina en qué punto se evidencia la mayor amplitud, esto con la ayuda de la vista B-Scan que muestra el pico de mayor altura. Una vez fijada la mayor amplitud, se divide el valor numérico de esta en 2, para colocar un cursor antes y después del punto de mayor amplitud, es decir si la amplitud máxima es de 50% se coloca un cursor en 25% antes y uno en 25% después del punto, así se determina la longitud de la indicación.

Para la altura y anchura de la indicación se utiliza la vista S-Scan, como se muestra en el siguiente ejemplo:

En la figura 2 se puede observar la vista S-scan de una indicación, para dimensionar su altura y anchura se aplica la técnica de la caída de los 6 decibeles, y en los dos cursores generados se hace un cruce en cada uno formando un rectángulo cuya diagonal será medida automáticamente por el software para establecer la altura y la anchura.

Figura 2. Vista S-scan como ejemplo para dimensionar.



A) Vista S-scan

B) Ampliación de la vista S-scan

Figura 2. Vista S-scan de indicación ejemplo.

3.3. SOLDADURA

Según la definición de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés), la soldadura es la coalescencia localizada entre dos metales o no metales producida por el calentamiento de los materiales a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión o metal de aporte. El tipo de soldadura a tratar en este proyecto es un proceso de unión entre dos materiales por fusión, en este caso metales [7]. La soldadura de estructuras metálicas implica la unión de materiales diferentes, siendo una de las uniones disímiles más comúnmente encontradas en la industria química, del níquel, petroquímica y en plantas de generación de electricidad en tuberías de centrales de ciclo combinado, la formada entre el acero al carbono o de baja aleación y el acero inoxidable.

3.4. DEFECTOLOGÍA EN PLACAS SOLDADAS

Antes de cualquier proceso de soldadura se debe efectuar un diseño tanto geométrico como experimental con todas las especificaciones necesarias, a este

procedimiento se le denomina *Welding Procedure Specification* (WPS, por sus siglas en inglés) junto con su respectiva evaluación *Procedure Qualification Record* (PQR, por sus siglas en inglés) que se realizan bajo un código o norma, sin embargo estos procedimientos no aseguran que la soldadura quede sin imperfecciones por lo que durante y después de ejecutar la unión soldada se realizan inspecciones que comúnmente revelan discontinuidades.

Una discontinuidad es una variación en la homogeneidad de la junta soldada en su estructura, características mecánicas, metalúrgicas o físicas. Una discontinuidad es una variación en la homogeneidad de la junta soldada en su estructura, características mecánicas, metalúrgicas o físicas. Una discontinuidad no necesariamente es un defecto, para que la discontinuidad sea defecto debe afectar el material al punto de que éste no cumpla con los estándares de calidad, de tal forma que le impida ejercer la función para la que fue fabricado; el término defecto implica rechazo. A continuación, en la tabla 2, se presentan algunos defectos en soldadura.

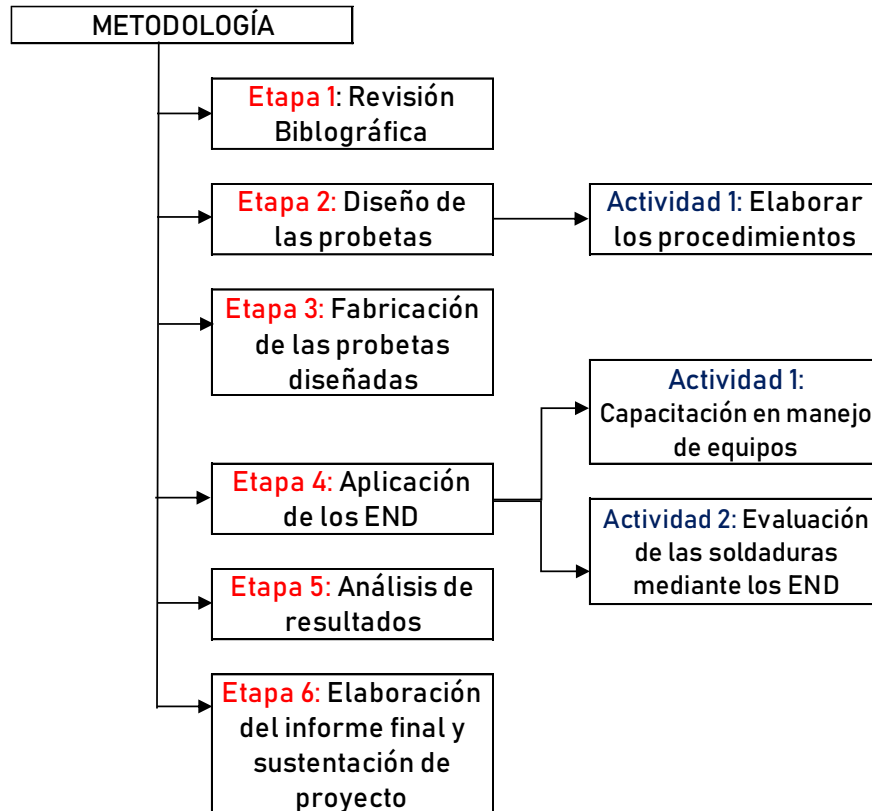
Tabla 2. Defectología en placas soldadas [9].

Indicaciones	Imagen	Causas
Porosidad	Se produce a partir del gas atrapado durante la solidificación del metal de aporte. Generalmente se presentan en cavidades de forma esferoidal, se puede presentar entre los pases de soldadura.	Revestimiento húmedo, alto amperaje, avance rápido
Grietas	Discontinuidades tipo fractura con bordes agudos, relación alta entre largo y ancho	Electrodo inadecuado, esfuerzos internos acumulados, enfriamiento brusco.
Socavaduras	Indicación en forma de concavidad que se presenta como una muesca fundida dentro del metal base.	Alto amperaje, electrodo inadecuado.
Falta de fusión	Se trata de una fusión entre pases o entre el metal de soldadura y el base, que no se realizó completamente	Mal diseño de junta, aporte de calor insuficiente, falta de acceso a todas las caras de fusión, presencia de impurezas.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 3 se presentan las seis etapas de la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de la presente investigación. Seguidamente se describe cada una de ellas.

Figura 3. Esquema de la metodología a realizar para el desarrollo del proyecto.



4.1. ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Para el desarrollo del presente proyecto se revisaron diferentes fuentes bibliográficas como los códigos y normas de ASME, ASTM, AWS y GTC, entre otras, dentro de las cuales destacamos las siguientes: SNT-TC-1A para la calificación de personal en los ensayos no destructivos implicados durante el entrenamiento y/o capacitación, ASME sección V para la fabricación de un bloque de calibración en el ultrasonido por arreglo de fases, según el numeral T.434.2; ASTM E2700 para la aplicación del ultrasonido por arreglo de fases; ASTM E1742 para la aplicación de

radiografía industrial junto con la ASTM E747 para selección de indicadores de calidad de imagen; AWS D1.1 para la generación de los procedimientos de soldadura disímil; GTC 110 para la inspección visual de las juntas soldadas, entre otros.

Para la generación de defectos se utilizó el diagrama de Schaeffler con el objetivo de generar una microestructura susceptible al agrietamiento, junto con el artículo de Gonzalo Duarte [9] y el trabajo de grado de Richard Antonio Peña [10]. Para el proceso de soldadura GTAW se utilizó el “Manual de Soldadura de West Arco” [11] además, los aportes realizados por el soldador certificado.

4.2. ETAPA 2: DISEÑO DE LAS PROBETAS

En la presente etapa se realizó el diseño de las probetas, resumiendo los resultados en un WPS, indicando dimensiones de las placas, biseles, espesor y variables de soldadura, a continuación, se detalla el procedimiento seguido.

4.2.1. Actividad 1: Elaboración de los procedimientos WPS

Con base en la información revisada y el apoyo de un soldador certificado, se elaboró un WPS para cada probeta, en condiciones que favorecieran la formación de los defectos establecidos. Para lo anterior, se detallaron los parámetros a seguir durante la soldadura por proceso GTAW y la generación de defectos, por lo que se siguió la norma AWS D1.1, una vez realizado, se procedió a la ejecución del proceso de soldadura siguiendo el WPS especificando todos los detalles.

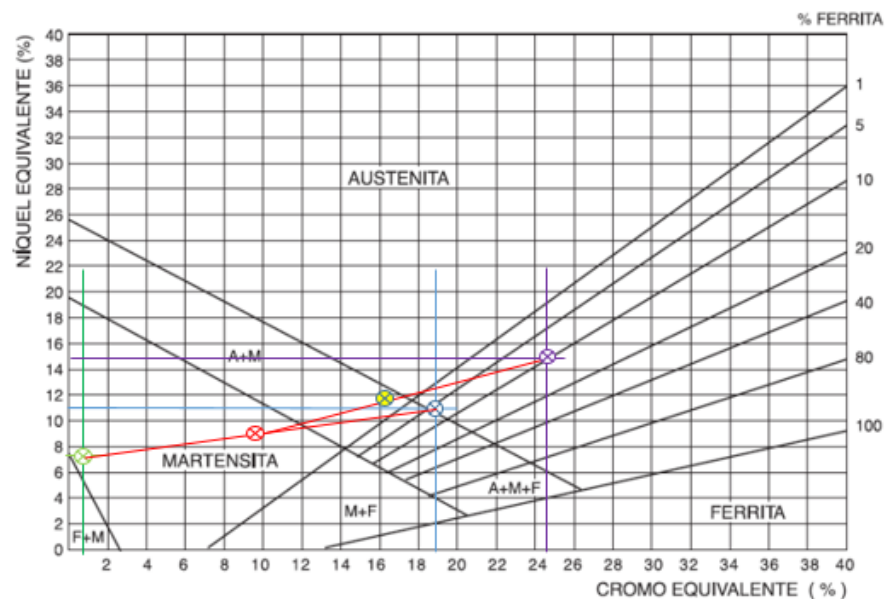
4.3. ETAPA 3: FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DISEÑADAS.

En la etapa de fabricación de probetas, se soldaron tres juntas disímiles, con material base de acero inoxidable AISI 316 y acero al carbono ASTM A 36, junto con un acero inoxidable, especificado en el WPS, en barra como material de aporte. En el proceso GTAW el electrodo de tungsteno fundió el material de aporte y los bordes del bisel de los materiales bases bajo una atmosfera controlada, que luego

de una solidificación dieron como resultado una junta soldada, a la que se le indujeron los siguientes defectos: grietas, socavaduras y falta de fusión.

Para la formación de las grietas se diseñó la soldadura con materiales pre-seleccionados que según el diagrama de *Schaffler*, tienden a formar un metal de soldadura agrietado, al ubicar los puntos de los materiales bases y el material de aporte, según su cromo y níquel equivalente se tiene las siguientes ubicaciones en la figura 4.

Figura 4. Diagrama de *Schaffler*



Se trazó una línea entre los dos metales de base y se halló la mitad de dicha longitud suponiendo que los dos metales participan por igual en el proceso de la soldadura, este punto medio es el punto rojo, luego se trazó una línea entre el punto rojo y el punto del metal de aporte, teniendo en cuenta que la dilución del proceso GTAW es de 43.6 % se recorrió desde el punto morado el 43.6% de la distancia entre el punto rojo y morado, esta distancia se denota con el punto final amarillo que predice que el metal de soldadura tendrá una microestructura de Martensita y Austenita, con un número de ferrita menor a cero, susceptible a la agrietamiento.

4.4. ETAPA 4: APLICACIÓN DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

En la presente etapa se realizaron las actividades relacionadas con la aplicación de los Ensayos No Destructivos sobre las probetas soldadas. A continuación, se describen cada una de ellas:

4.4.1. Actividad 1: Capacitación en el manejo de equipos

En esta actividad se estudiaron los manuales, junto con los requisitos de las normas correspondientes a cada técnica y finalmente se aplicaron los procedimientos hasta verificar que los resultados eran repetibles y correctos en inspección visual, radiografía industrial y ultrasonido por arreglo de fases. A continuación, se detalla cada técnica.

En la inspección por Radiografía Industrial, se realizó la capacitación en manejo de los siguientes equipos: el dosímetro, RADOS RDS-30, utilizado para el medir el nivel de radiación durante el periodo de exposición. Indicadores de calidad de imagen, 1A ASTM 6, utilizados para el montaje de la placa soldada antes de ser irradiada, aquí también se utilizaron letras de plomo con la finalidad de diferenciar las placas entre sí. Equipo generador de rayos X, BALTOSPOT CF2000, una vez determinado el tiempo de exposición, mediante las cartas de exposición de Balteau NDT, se procedió a utilizar el equipo de radiación en un cuarto con paredes blindadas con plomo y se insertaron datos anteriormente determinados, la placa montada fue rodeada con bloques de plomo, para eliminar energía retrodispersada. Película radiográfica de plomo, FUJI X-R FILM 100 +Pb, para la captura de imagen, estas películas fueron cortadas en un cuarto oscuro. Soluciones de revelado y baño de parada, según la norma ASTM E1742, se prepararon soluciones químicas para el tratamiento de las películas de plomo con la finalidad de revelar las imágenes generadas.

Para la inspección por Ultrasonido por arreglo de fases, se contó con la capacitación en la calibración del equipo OLYMPUS OMNISCAN-MX2, con la toma de medidas en bloques de referencia verificando las mediciones, luego se procedió con la

realización de calibraciones, siguiendo la norma ASTM E2700 y ASME sección V con base en el manual de usuario del equipo Omniscan, para la inspección de las probetas soldadas. Después se realizó la toma de *datos* y se hizo una capacitación en medición y caracterización de indicaciones mediante el software OmniscanPc 4.3. Todo lo anterior basados en recursos bibliográficos ya mencionados, para entender el funcionamiento y principio de la detección de indicaciones mediante el ultrasonido por arreglo de fases.

Los END mencionados se aplicaron siguiendo todos los detalles indicados en las respectivas normas. A continuación, se detallan las condiciones de inspección:

4.4.2. Inspección Visual

Se presenta la tabla 3, con las especificaciones de la evaluación por inspección visual.

Tabla 3. Parámetros de Inspección visual.

INSPECCIÓN VISUAL EN PLACAS SOLDADAS	
Inspección en corona, raíz y cordón.	CONDICIONES
	ILUMINACIÓN 1000 Lx
	DIMENSIONAMIENTO
	Galgas, lupas 6x, regletas metálicas
NORMATIVIDAD	ASME V Art.9, VIII Div. 2 , GTC 110

4.4.3. Radiografía Industrial

En la siguiente tabla se presentan las condiciones de inspección por Radiografía industrial.

Tabla 4. Parámetros de Radiografía Industrial.

RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL			
Distancia Fuente - película :	700 [mm]	Dosímetro:	RDS-30
Amperaje:	5 [Mamp]	IQI:	1A ASTM 6
Pre calentamiento del equipo:	Sí	Tiempo de Expo:	1.75 [min]
Tiempo de revelado:	5 [min]	Película Radiográfica	Fuji X-Ray Film
Tiempo de baño de parada:	1 [seg]	Normatividad:	ASTM E94, ASTM 747
Tiempo de Fijado:	10 [min]	Equipo radiográfico	BALTOSPOT CF2000
Tiempo de lavado:	15 [min]	Cuarto oscuro	sí
Grado de oscuridad:	Sí con SM-10T	Kilovoltaje:	75 [Kv]

4.4.4. Aplicación de Ultrasonido Por Arreglo de Fases

En la siguiente sección se presenta la tabla 5, con condiciones de la evaluación por Ultrasonido por arreglo de fases.

Tabla 5. Parámetros de Ultrasonido por arreglo de fases.

ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES			
PARAMETROS		CALIBRACIÓN	
Normatividad :	ASTM E2700, ASME V	ACERO AISI 316	ASTM A36
Equipo de PAUT:	OMNISCAN MX2	Velocidad: 3120 m/s	Velocidad: 3200 m/s
Palpador:	Olympus 5L16- SA10	Bloque AWS IIV	Bloque AWS IIV
Arreglo:	Lineal 16 elementos activos	Curva TCG:	Curva TCG:
		Sí, bloque SAE 316	Sí, bloque ASME
Angulo de barrido:	44° a 69°	Software de análisis:	OmniscanPC4.3
Acoplante:	Aceite multigrado		

4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos de la medición de discontinuidades con los diferentes ensayos ya preestablecidos en la metodología, se realizó una comparación entre las diferentes técnicas de inspección estableciendo criterios que definen facilidad y sensibilidad en la caracterización de las indicaciones inducidas.

4.6. ELABORACIÓN DE INFORME FINAL

Al finalizar el análisis de resultados y la comparación entre las diferentes técnicas de inspección, se realizó un informe final sobre el proyecto y se sustentó en la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados, con su respectivo análisis, a partir del desarrollo de la metodología experimental planteada.

5.1. ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA, WPS, PARA LAS TRES PROBETAS SOLDADAS

Las soldaduras fueron fabricadas a partir de especificaciones presentadas en un WPS específico para cada una de las tres probetas. En la tabla 6 se presenta el WPS para la probeta 1 siguiendo el código AWS D1.1-2015, presentando todas las especificaciones para realizar la unión. Los WPS de las probetas 2 y 3 se presentan en el anexo A y B.

Tabla 6. WPS 1: Especificaciones para fabricar la probeta 1.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)			
Nombre de la compañía: <u>Universidad Industrial de Santander UIS</u>		Por: <u>Santiago Tique</u>	
Procedimiento de soldadura No: <u>1</u>		Fecha: <u>9/09/2018</u>	
Revisión No: <u>1</u>		Fecha: <u>20/03/2109</u>	
Proceso de Soldadura: <u>GTAW</u>			
SOLDADOR			
Nombre: <u>Jorge Alberto Fuentes</u>	CC: <u>91.540.055</u>	Estampe: <u>JAF</u>	
JUNTAS		DETALLES	
Diseño de la junta: <u>En bisel</u>		Bisel de 30 grados entre el material base y la vertical Las dimensiones de cada placa del material base es de 150x50x6 (mm)	
Respaldo: <u>Sí</u>			
Material de respaldo: <u>E1018 1/8"</u>			
Metal base 1: <u>AISI SAE 316</u>			
Metal base 2: <u>ASTM A36</u>			
Metal de aporte: <u>ER 309 3/32"</u>			
DIMENSIONES			

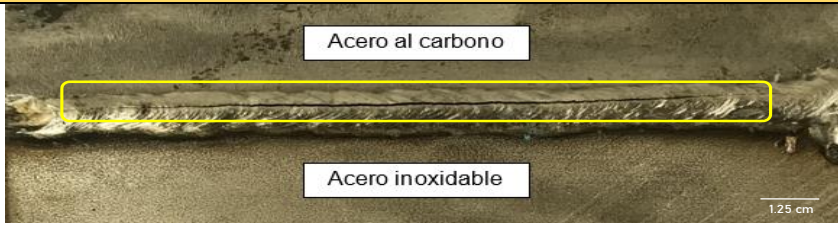

Continuación de la tabla 6								
METAL BASE 1 (ESPECIFICACIONES)								
Tipo y grado:		<u>ASTM A36</u>						
Análisis químico:		<u>0.26 %C 0.4%Si</u>						
Propiedades Mecánicas:		<u>R. a la tracción: 379 MPa Límite elástico: 206 Mpa, % de Elongación: 22%</u>						
METAL BASE 2 (ESPECIFICACIONES)								
Tipo y grado:		<u>AISI 316</u>						
Análisis químico:		<u>10.03%Ni 0.024 %C 16.01%Cr 2.02%Mo 0.483%Si 1.63 %Mn</u>						
Propiedades mecánicas :		<u>R.a la tracción: 515 MPa Límite elástico: 205 Mpa, % de Elongación: 40%</u>						
METAL DE APORTE (ESPECIFICACIONES)								
Tipo y grado:		<u>309L</u>						
Análisis químico:		<u>13.9%Ni 0.02%C 23.7%Cr 0.04%Mo 0.51%Si 1.8 %Mn</u>						
Propiedades mecánicas:		<u>R. a la tracción: 550 MPa % de Elongación: 30 %</u>						
(RESPALDO) ESPEFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)								
POSICIONES				TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA				
Posición de ranura:		<u>NA</u>		Temperaturas:		<u>NA</u>		
Progresión de soldadura:		<u>1G</u>		Tiempos:		<u>NA</u>		
Posición de filete:		<u>NA</u>						
PRECALENTAMIENTO				GAS				
Tiempo de precalentamiento mínimo :		<u>2-5 Minutos</u>		Protección:		<u>Argón</u>		
Tiempo de precalentamiento máximo :		<u>NA</u>		Arrastre:		<u>NA</u>		
Tiempo de precalentamiento :		<u>NA</u>		Respaldo:		<u>NA</u>		
TÉCNICA								
Tipo de cordón:		<u>Longitudinal</u>						
Tamaño de orificio o taza de gas:		<u>NSPI</u>						
Limpieza inicial y entre pasos:		<u>SI</u>						
Método de cincelado posterior:		<u>NA</u>						
Oscilación:		<u>NA</u>						
Tipo de paso:		<u>NA</u>						
Electrodo o material de aporte:		<u>ER 309 3/32"</u>						
Velocidad de recorrido:		<u>NSPI</u>						
Martillado:		<u>NO</u>						
Otros:		<u></u>						
Capas de soldadura	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de recorrido	Otros
		Clase	Diámetro	Tipo polar	Amperaje			
5	GTAW	ER 309	3/32"	CA	40-70 A	10 - 20 kV	--	--
1	SMAW	E 6013	1/8"	CA	80-150 A	30-80 V		

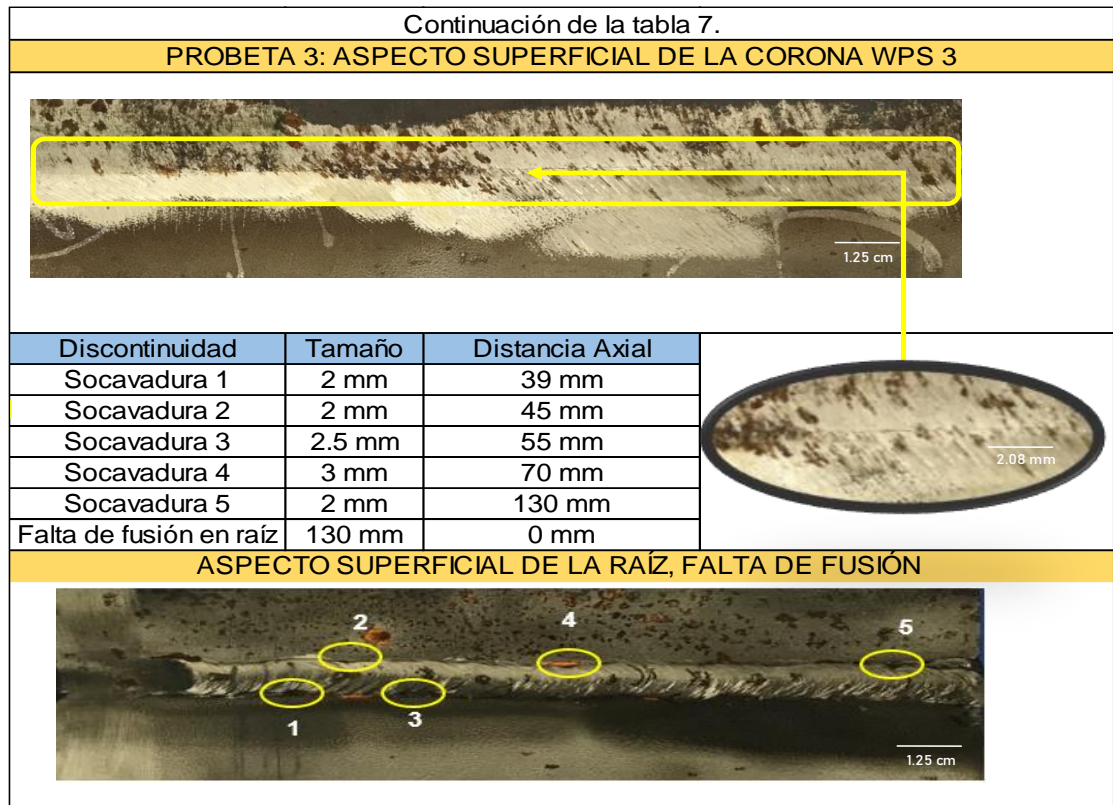
Continuación de tabla 6.
OBSERVACIONES
En la probeta 1 se generó un agrietamiento a lo largo de la soldadura; lo anterior se logró mediante la variación del amperaje en el pase de presentación aplicando proceso SMAW. Justo al terminar el pase final se generó un cambio brusco de temperatura mediante enfriamiento con chorro de agua facilitando el agrietamiento. Para la formación de la grieta se diseñó el WPS 1 seleccionando los materiales según el diagrama de Schaffler, de tal forma que el material de soldadura fuera susceptible al agrietamiento, lo anterior se logró ya que el diagrama de Schaffler predice la microestructura de un metal de soldadura entre uniones disímiles o uniones convencionales, de acuerdo a los parámetros del Níquel equivalente y Cromo equivalente que asociados dan posiciones en el diagrama que son los límites entre líneas de uniones y según el porcentaje de dilución del proceso de soldadura, GTAW en este caso, mostrará una microestructura teórica, de acuerdo a la zona en la que termine la ubicación susceptible al agrietamiento, que tendrá el metal de soldadura. En el Anexo C se presenta el diagrama de Shaeffler.

5.2.RESULTADOS DE INSPECCIÓN MEDIANTE DE ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES Y RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL PARA LAS TRES PROBETAS.

A continuación, se presenta en la en la tabla 7 las probetas soldadas, indicando el material de base, el aspecto general de la soldadura y el defecto evidenciado a nivel superficial mediante inspección visual. La distancia axial hace referencia a la distancia desde el comienzo de la probeta hasta la indicación.

Tabla 7. Aspecto superficial de las tres probetas soldadas.

VISTA GENERAL DE LAS PROBETAS SOLDADAS			
PROBETA 1: GRIETA LONGITUDINAL OBTENIDA BAJO WPS 1.			
			
Distancia Axial :	20 mm	Discontinuidad:	Grieta longitudinal
Tamaño:	125 mm	Altura del cordón:	3 mm
*Nota: También se evidenció agrietamiento en la raíz y sovacaduras			
PROBETA 2 (FALTAS DE FUSIÓN INTERNAS WPS 2)			
			
Distancia Axial :	NA	Discontinuidad:	Ninguna superficial
Tamaño:	NA	Altura del cordón:	3 mm



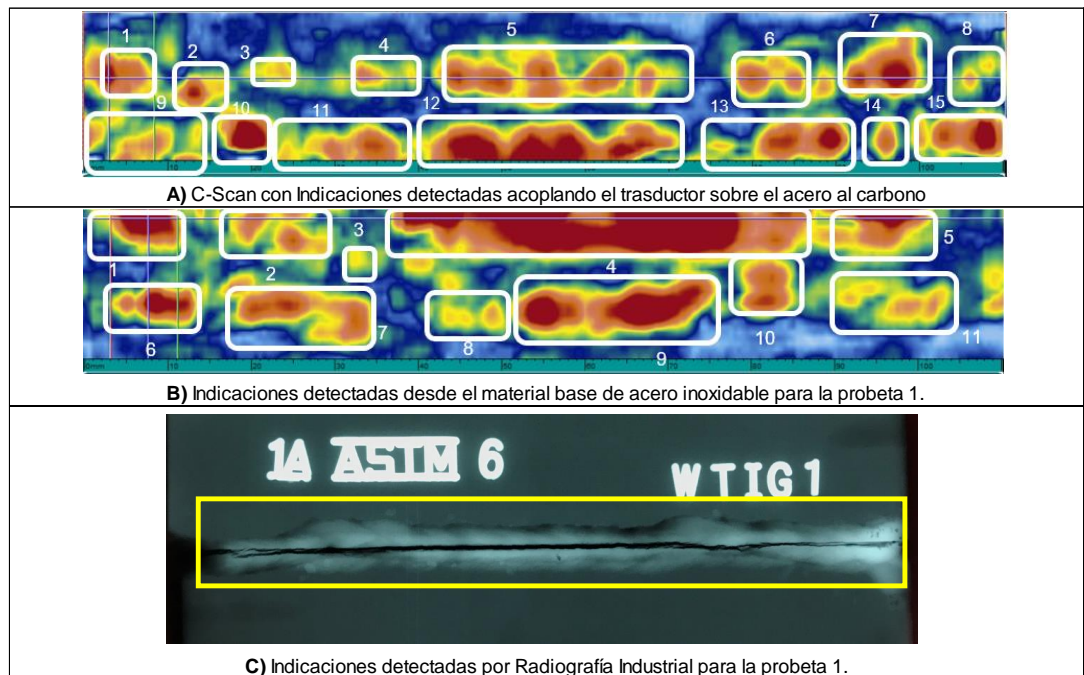
Con base en lo presentado en la tabla 7, se evidencia que las especificaciones indicadas en los WPS diseñados para las tres probetas, permitieron obtener los defectos esperados, grietas y faltas de fusión en el cordón de soldadura. Además, como consecuencia de las variables del WPS 1 y 3, se presentaron defectos asociados adicionales, correspondiendo a socavaduras a lo largo de la soldadura en la raíz para la probeta 1 y en la corona para la probeta 2. Los defectos inducidos en la probeta 2, no pueden ser evidenciados a nivel superficial por cuando corresponden a faltas de fusión internas.

5.3.INSPECCIÓN DE SOLDADURAS POR ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES Y RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Siguiendo la metodología planteada se presentan los resultados obtenidos con Ultrasonido por arreglo de fases y Radiografía Industrial en la probeta 1. Los

resultados de ultrasonido corresponden a visualizaciones bi-dimensionales C-Scan obtenidas con el acople del transductor sobre cada uno de los materiales base, indicadas en la figura 4. En el anexo D se presentan las visualizaciones S-scan que fueron empleadas para determinar la ubicación del defecto en la sección transversal a la soldadura. Para las tres probetas se obtuvo un resultado al realizar un barrido a lo largo del eje de inspección acoplado el transductor sobre el acero al carbono y sobre el acero inoxidable.

Figura 5. Resultados obtenidos en la probeta 1. A y B) Indicaciones detectadas al acoplar el transductor sobre el acero al carbono y el acero inoxidable respectivamente. C) Película radiográfica obtenida de la probeta 1.

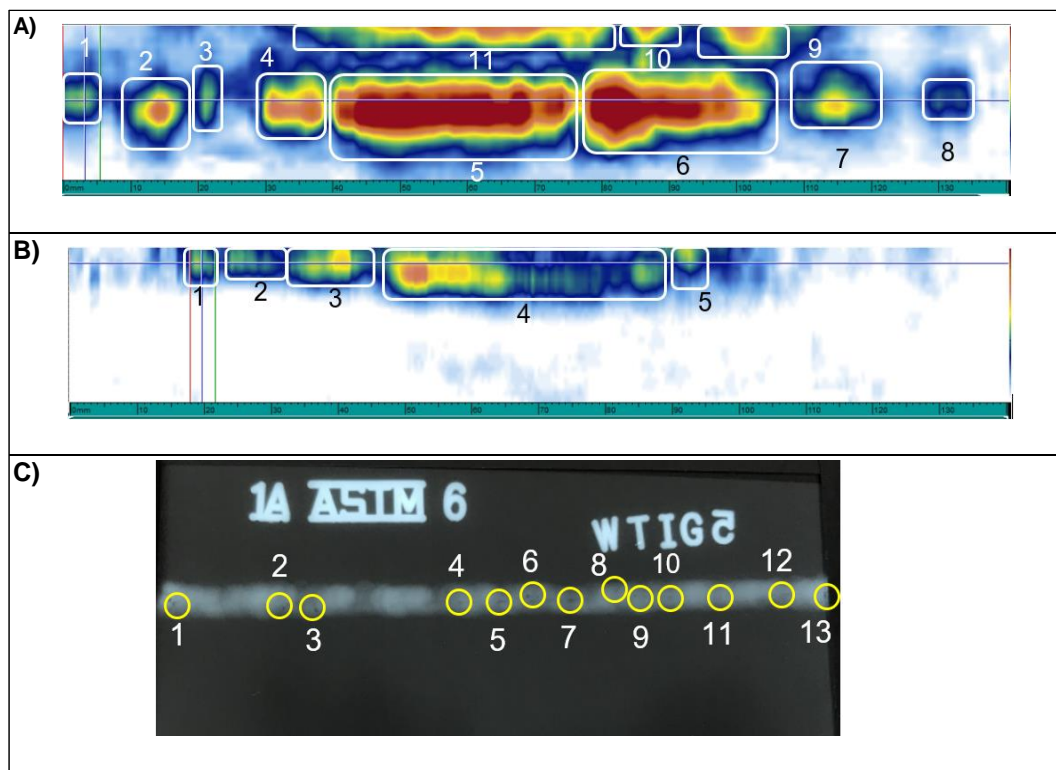


En las figuras 4a y 4b se observa que existe una diferencia entre las visualizaciones respecto a la figura 4 c para la probeta 1 concluyendo que la película radiográfica permite caracterizar dimensional y morfológicamente con gran rapidez el defecto presente, grieta longitudinal y las socavaduras presentes en la probeta 1. Sin embargo, no discrimina la grieta longitudinal de la corona con la de la raíz por cuanto proyecta todo en un plano lo cual genera una evaluación susceptible a errores y

desviaciones respecto a la presencia real de los defectos. Por otra parte las visualizaciones C-scan de la figura 4 y las vistas S-scan del anexo D permiten ver que hay dos grietas separadas, una en la raíz y otra en la corona como se puede evidenciar visualmente, sin embargo, la presencia de socavaduras en la raíz impide ver de manera continua la grieta por ultrasonido.

En la figura 5a y 5b se presentan los resultados obtenidos con las vistas C-scan para la probeta 2 acoplado el transductor en el acero al carbono y en el acero inoxidable respectivamente. En la figura 5c se presenta la película radiográfica

Figura 6. Resultados obtenidos en la probeta 2. A y B) Indicaciones detectadas al acoplar el transductor sobre el acero al carbono y el acero inoxidable respectivamente. C) Película radiográfica obtenida de la probeta 2.

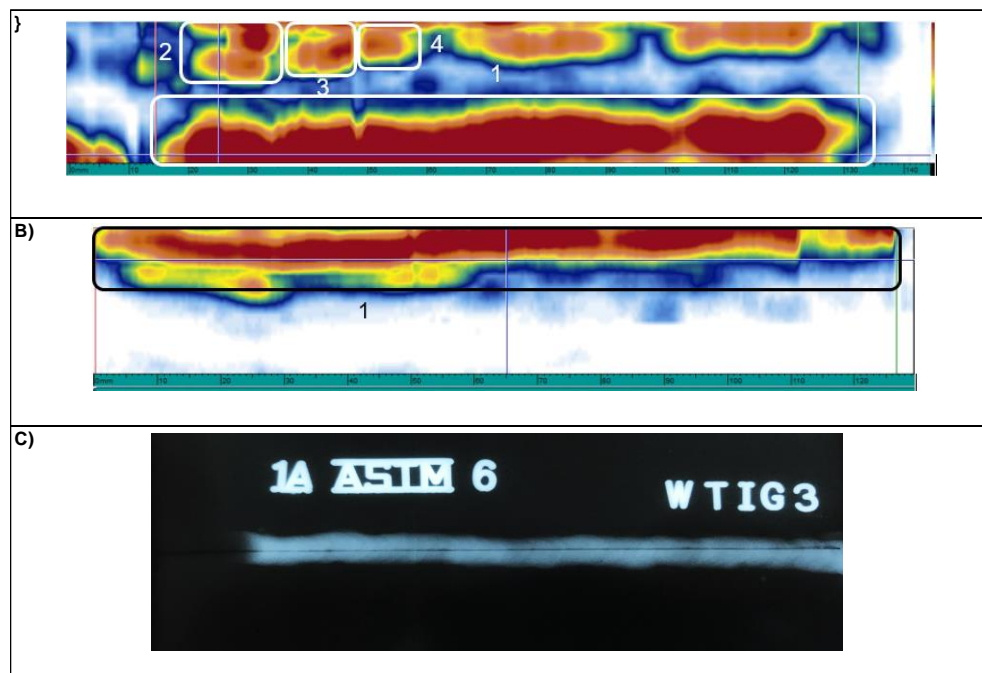


En la figura 5 B, en las indicaciones 1, 2, 3, 4 y 5 se puede observar las falta de fusión en la raíz que se ve por partes en la radiografía de la 5 C en las indicaciones 1 a la 13, la 5 A, muestra además de la falta de fusión en la raíz (indicaciones 11,10 y 9), faltas de fusiones internas (indicaciones de la 1 a la 8), es decir para el

Ultrasonido por arreglo de fases se detectaron faltas de fusión internas en el cordón (8) acoplado desde el acero al carbono y faltas de fusión en la raíz (8) acoplado el transductor en el acero al carbono e inoxidable. Para la Radiografía Industrial que da la ubicación y forma de la indicación desde una sola vista, se puede observar faltas de fusiones, sin que se pueda ver la altura de la indicación para establecer si se está en el bisel o en la raíz como en el ultrasonido por arreglo de fases; se denota una menor sensibilidad de la Radiografía Industrial al detectar por partes algo continuo como la falta de fusión en la raíz de la probeta.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial de la probeta 3. En la figura 6 A y B se observan dos vistas C-Scan para el acero inoxidable y acero al carbono, en la figura 6 C la película radiográfica.

Figura 7. Resultados obtenidos en la probeta 3. A y B) Indicaciones detectadas al acoplar el transductor sobre el acero al carbono y el acero inoxidable respectivamente. C) Película radiográfica obtenida de la probeta 3.



En figura 6 B de la vista C-Scan acoplado en el acero inoxidable se puede evidenciar una falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura (indicación 1), que concuerda con lo detectado también en la vista C-Scan desde el acero al carbono, también se evidencian otras discontinuidades tipo socavadura en la corona que coincide con lo evidenciado en la inspección visual de placa 3. Para la Radiografía Industrial se muestra la falta de fusión en la raíz, pero ninguna socavadura, lo que resulta en una mayor sensibilidad para el ensayo de Ultrasonido por Arreglo de fases.

5.4.EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD Y FACILIDAD DE INSPECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES Y RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

La comparación de las dos técnicas evaluadas con base en lo evidenciado en los resultados obtenidos bajo las condiciones del presente trabajo empleando las técnicas de Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial permite mostrar mayor sensibilidad de la técnica de Ultrasonido por Arreglo de Fases respecto a Radiografía Industrial. La sensibilidad se evaluó en función de la cantidad de indicaciones detectadas en las probetas fabricadas, las cuales fueron de tipo planar, inducidas durante proceso de soldadura, lo anterior teniendo en cuenta el defecto en su totalidad y no la suma de múltiples tramos cortos como si detectara mayor cantidad de indicaciones siendo la misma vista solo en ciertos tramos, además de esto, también con la ayuda de vistas trasversales como la S-scan se pudo determinar si el defecto se encontraba en la corona, mitad o raíz del cordón, con la vista C-scan, se determinó a que distancia axial se encontró y con la morfología del eco se determinó qué tipo de defecto se está tratando (ecodinámica), en el caso de la Radiografía industrial que solo da una vista superior de la disposición de los defectos, se puede determinar una distancia axial y un tamaño en longitud y anchura, pero no en profundidad o altura, además los defectos que se encuentren detrás de otros, se solapan y no se detectan como en el caso de la grieta

de la raíz en la probeta 1, que fue ocultada por la grieta en la corona en la misma placa.

En la realización de la Radiografía Industrial de las tres placas soldadas, se comprobó una mayor facilidad con respecto a la realización del Ultrasonido por Arreglo de Fases, ya que en capacitación la Radiografía Industrial requiere menos horas de entrenamiento y la fijación de parámetros es rápida, a diferencia del Ultrasonido por Arreglo de Fases que requiere más capacitación tanto en horas teóricas como prácticas, la fijación de parámetros como la calibración pre-inspección con la fabricación o adquisición de bloques demanda más tiempo, y el manejo post-inspección del software e interpretación de resultados finalmente hace que el Ultrasonido por Arreglo de fases sea considerablemente más laborioso.

En el anexo E, F y G se muestran las dimensiones de las indicaciones evidenciadas por Radiografía Industrial y Ultrasonido por Arreglo de Fases. En el caso del dimensionamiento en el ensayo de Ultrasonido por Arreglo de Fases se realizó mediante el software de análisis OmniPc, ubicando los cursores auxiliares de acuerdo a la caída de los 6 decibeles en la vista S-Can, se genera una diagonal que establece altura y profundidad, mientras que en la vista C-Scan se establece la longitud de la indicación. Para la Radiografía Industrial, se hace una medición directa sobre la película radiográfica ya que queda en escala 1:1 con respecto al cordón de soldadura y su zona cercana.

Finalmente, también se puede afirmar que la inspección mediante Ultrasonido por Arreglo de Fases produce más información de la indicación detectada, al dimensionarla en profundidad altura y longitud, en un proceso laborioso, largo y tedioso que requiere de bastante entrenamiento y horas de experiencia, además de la posible fabricación de bloques de calibración como en este caso que se realizó uno del mismo material base del acero inoxidable para su calibración.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con el desarrollo de la presente investigación, la cual se enfocó en la evaluación de defectología inducida en probetas disimiles, mediante el ensayo de Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial, bajo las condiciones experimentales, se concluye lo siguiente:

Al diseñar los procedimientos de soldadura con las especificaciones de ejecución, en los WPS con los mecanismos de defectología se logró satisfactoriamente la fabricación de probetas soldadas con las indicaciones esperadas.

Parámetros planteados como la preselección de materiales susceptibles al agrietamiento y mala técnica de ejecución, se vieron reflejados en defectos que se evidenciaron en la evaluación por END de las probetas finales.

Los ensayos aplicados para la inspección de las tres probetas obtenidas permitieron establecer cual entre ellos es más sensible, cuál tiene la mayor facilidad y/o rapidez de ejecución al dar la información suficiente sobre: detección de discontinuidades, dimensionamiento, aspectos pre-inspección, aspectos post-inspección, interpretación y análisis de resultados, para realizar una comparación de acuerdo a los resultados.

Los resultados de Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial fueron apoyados por una Inspección Visual de cada probeta lo que permitió el relacionamiento de información corroborando así lo evidenciado superficialmente en los resultados de la Inspección Visual con los resultados del Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial. Aspecto como el solape de defectos en la placa 1, dejaron en evidencia la falta de diferenciación entre estos que existe en la Radiografía Industrial ya que no discrimina uno del otro, como en el caso de las grietas. En el Ultrasonido por Arreglo de Fases, se observó que este si diferencia los defectos mediante sus diferentes vistas que con su respectivo análisis deja en

evidencia los defectos por aparte, además de la detección de más indicaciones en número, por lo que termina siendo el ensayo con mayor sensibilidad al detectar más indicaciones, al diferenciarlas y al detectar indicaciones más pequeñas como en el caso de la probeta 2, que evidenció faltas de fusiones internas que no se vieron en la Radiografía Industrial en esta misma placa.

En la ejecución de los ensayos, para la inspección de las tres probetas soldadas, se pudo observar que en el Ultrasonido por Arreglo de Fases aunque aporta más información sobre las indicaciones al dimensionarlas en altura, profundidad y longitud y al ubicarlas en la probeta, resulta siendo el ensayo más laborioso por todos sus requerimientos antes y después de su ejecución en comparación con la Radiografía Industrial que termina siendo la técnica más fácil de realizar al ser más rápida en su ejecución y en su análisis.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar este tipo de investigación en soldaduras de filete ya sea en bordes rectangulares o en juntas tipo "T", ya que esta disposición de unión generaría cambios en los parámetros para la ejecución tanto de los ensayos como de la inducción de defectos.

Como complementación al proyecto recomiendo realizarlo en soldadura de tubería, con la finalidad de evidenciar cómo varían los resultados en función de la morfología del cordón de soldadura.

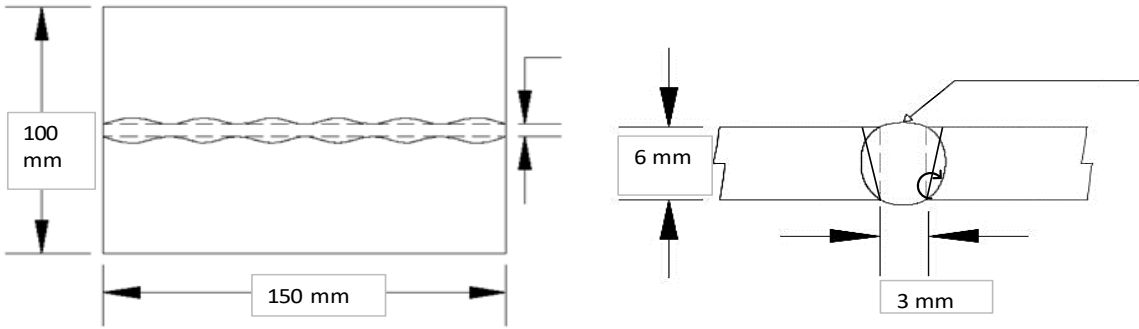
CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KALPAKIJAN, S.; SCHMID, S. R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5ta Edición. México: Pearson Educación, 2002.
- [2] «UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Blogs de la Comunidad UTP. [15 de Julio de 2015].»
- [3] POGUET, Jerome; CIORAU, Peter. The influence of PAUT Parameters on Crack Location, Pattern and Height Sizing
- [4] Universidad Tecnológica de Pereira, Scientia et Technica Año XIII, No 34, RICAURTE OSPINA, HECTOR AGUIRRE, HERNANDO PARRA, 2007. 1p.
- [5] [10] PEÑA ANGARITA, Richard. VÁSQUEZ LANDAZABAL, Oscar. Fabricación y evaluación de probetas soldadas con defectología inducida para entrenamiento en END. Bucaramanga, 2015, Tesis de grado (Ingeniero Metalúrgico) Facultad de Ingeniería Físicoquímicas
- [6] KURZ, Jochen H; JÜNGERT, Anne; DUGAN, Sandra; DOBMANN, Gerd. Probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering NDT in probabilistic damage assessments [En línea] (2012), <http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/329_wcndtfinal00329.pdf> [Citado en Diciembre de 2017].
- [7] RAMIREZ. Heriberto, NUÑEZ. Enrique, SALCEDO. Jaime. Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados. Universidad del Norte, Edición Uninorte, 2009. 16p
- [8] OLIVIA MINILO, Carlos. Inspector de soldadura AWS QC1, Instituto Chileno de Soldadura, 2007. 177-191p.
- [9] Gonçalo Duarte Fazenda da Silva, Development and Production of Welded Flaw Specimens For Non-Destructive Testing, Instituto Superior Técnico.
- [11] Manual de Soldadura, West Arco, Bogotá DC, <<https://www.westarco.com/westarco/sp/support/documentation/upload/manual-de-soldadura-2015v2.pdf>>

BIBLIOGRAFÍA

- Gonçalo Duarte Fazenda da Silva, Development and Production of Welded Flaw Specimens For Non-Destructive Testing, Instituto Superior Técnico.
- KALPAKIJAN, S.; SCHMID, S. R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5ta Edición. México: Pearson Educación, 2002.
- KURZ, Jochen H; JÜNGERT, Anne; DUGAN, Sandra; DOBMANN, Gerd. Probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering NDT in probabilistic damage assessments [En línea] (2012), <http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/329_wcndtfinal00329.pdf>[Citado en Diciembre de 2017].
- Manual de Soldadura, West Arco, Bogotá DC, <<https://www.westarco.com/westarco/sp/support/documentation/upload/manual-de-soldadura-2015v2.pdf>>
- OLIVIA MINILO, Carlos. Inspector de soldadura AWS QC1, Instituto Chileno de Soldadura, 2007.177-191p.
- PEÑA ANGARITA, Richard. VÁSQUEZ LANDAZABAL, Oscar. Fabricación y evaluación de probetas soldadas con defectología inducida para entrenamiento en END. Bucaramanga, 2015, Tesis de grado (Ingeniero Metalúrgico) Facultad de Ingeniería Físicoquímicas
- POGUET, Jerome; CIORAU, Peter. The influence of PAUT Parameters on Crack Location, Pattern and Height Sizing
- RAMIREZ. Heriberto, NUÑEZ. Enrique, SALCEDO. Jaime. Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados. Universidad del Norte, Edición Uninorte, 2009. 16p
- Universidad Tecnológica de Pereira, Scientia et Technica Año XIII, No 34, RICAURTE OSPINA, HECTOR AGUIRRE, HERNANDO PARRA, 2007. 1p.
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Blogs de la Comunidad UTP. [15 de Julio de 2015].

Anexo A. WPS 2 para la probeta 2

ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)	
Nombre de la compañía: <u>Universidad Industrial de Santander UIS</u>	Por: <u>Santiago Tique</u>
Procedimiento de soldadura No: <u>1</u>	Fecha: <u>9/09/2018</u>
Revisión No: <u>1</u>	Fecha: <u>20/03/2109</u>
Proceso de Soldadura: <u>GTAW</u>	
SOLDADOR	
Nombre: <u>Jorge Alberto Fuentes</u>	CC: <u>91.540.055</u> Estampe: <u>JAF</u>
JUNTAS	DETALLES
Diseño de la junta: <u>En bisel</u>	Bisel de 30 grados entre el material base y la vertical Las dimensiones de cada placa del material base es de 150x50x6 (mm)
Respaldo: <u>Sí</u>	
Material de respaldo: <u>E1018 1/8"</u>	
Metal base 1: <u>AISI SAE 316</u>	
Metal base 2: <u>ASTM A36</u>	
Metal de aporte: <u>ER 309 3/32"</u>	
DIMENSIONES	
	
Continuación de la tabla 6	
METAL BASE 1 (ESPECIFICACIONES)	
Tipo y grado: <u>ASTM A36</u>	
Análisis químico: <u>0.26 %C 0.4%Si</u>	
Propiedades Mecánicas: <u>R. a la tracción: 379 MPa Límite elástico: 206 Mpa, % de Elongación: 22%</u>	
METAL BASE 2 (ESPECIFICACIONES)	
Tipo y grado: <u>AISI 316</u>	
Análisis químico: <u>10.03%Ni 0.024 %C 16.01%Cr 2.02%Mo 0.483%Si 1.63 %Mn</u>	
Propiedades mecánicas : <u>R.a la tracción: 515 MPa Límite elástico: 205 Mpa, % de Elongación: 40%</u>	
METAL DE APORTE (ESPECIFICACIONES)	
Tipo y grado: <u>309L</u>	
Análisis químico: <u>13.9%Ni 0.02%C 23.7%Cr 0.04%Mo 0.51%Si 1.8 %Mn</u>	
Propiedades mecánicas: <u>R. a la tracción: 550 MPa % de Elongación: 30 %</u>	

(RESPALDO) ESPEFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)								
POSICIONES				TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA				
Posición de ranura:		<u>NA</u>		Temperaturas:		NA		
Progresión de soldadura:		<u>1G</u>		Tiempos:		NA		
Posición de filete:		<u>NA</u>						
PRECALENTAMIENTO				GAS				
Tiempo de precalentamiento mínimo :		<u>2-5 Minutos</u>		Protección: <u>Argón</u>				
Tiempo de precalentamiento máximo :		<u>NA</u>		Arrastre: <u>NA</u>				
Tiempo de precalentamiento :		<u>NA</u>		Respaldo: <u>NA</u>				
TÉCNICA								
Tipo de cordón:		<u>Longitudinal</u>						
Tamaño de orificio o taza de gas:		<u>NSPI</u>						
Limpieza inicial y entre pasos:		<u>SI</u>						
Método de cincelado posterior:		<u>NA</u>						
Oscilación:		<u>NA</u>						
Tipo de paso:		<u>NA</u>						
Electrodo o material de aporte:		<u>ER 309 3/32"</u>						
Velocidad de recorrido:		<u>NSPI</u>						
Martillado:		<u>NO</u>						
Otros:		<u></u>						
Capas de soldadura	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de recorrido	Otros
		Clase	Diámetro	Tipo polar	Amperaje			
5	GTAW	ER 309	3/32"	CA	40-70 A	10 - 20 kV	--	--
OBSERVACIONES								
En la placa número 2 se generaron faltas de fusiones internas, o falta de fusiones entre los pases de soldadura, con un arco demasiado bajo, o intensidad baja, variando la velocidad de desplazamiento para así dejar zonas sin fundir completamente, además de variar la posición del electrodo.								

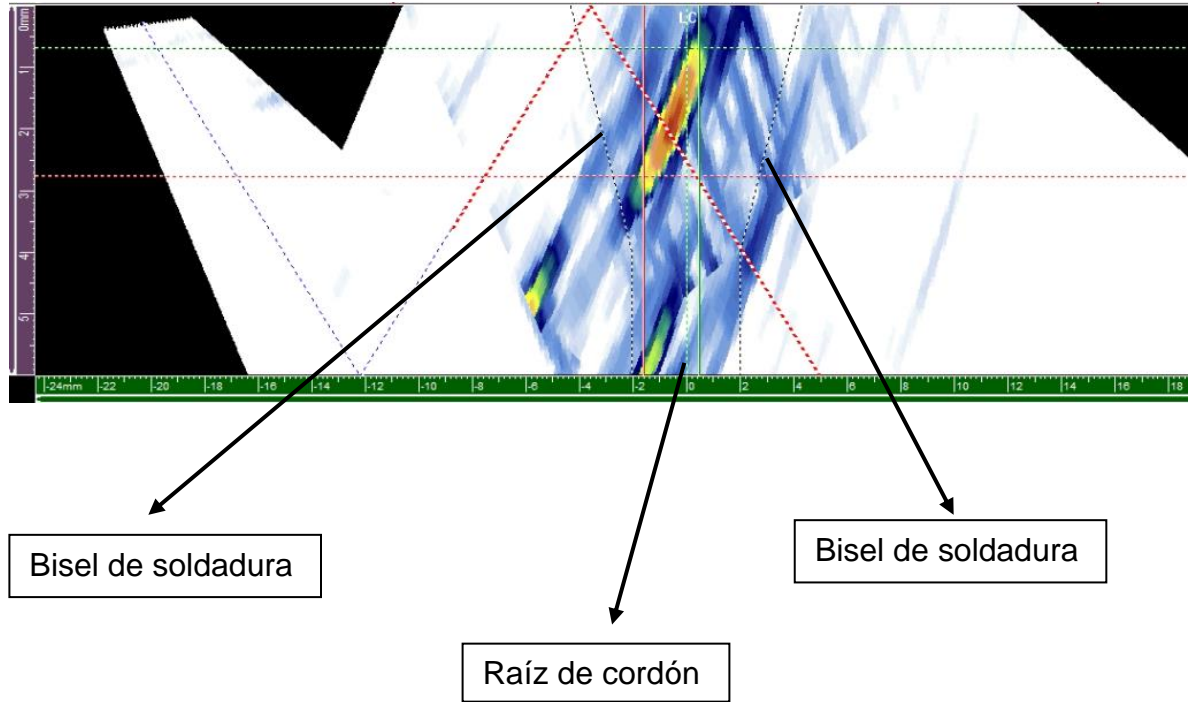
Anexo B. WPS 3 para la probeta 3.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)	
Nombre de la compañía: <u>Universidad Industrial de Santander UIS</u>	Por: <u>Santiago Tique</u>
Procedimiento de soldadura No: <u>1</u>	Fecha: <u>9/09/2018</u>
Revisión No: <u>1</u>	Fecha: <u>20/03/2109</u>
Proceso de Soldadura: <u>GTAW</u>	
SOLDADOR	
Nombre: <u>Jorge Alberto Fuentes</u>	CC: <u>91.540.055</u> Estampe: <u>JAF</u>
JUNTAS	DETALLES
Diseño de la junta: <u>En bisel</u>	Bisel de 30 grados entre el material base y la vertical Las dimensiones de cada placa del material base es de 150x50x6 (mm)
Respaldo: <u>Sí</u>	
Material de respaldo: <u>E1018 1/8"</u>	
Metal base 1: <u>AISI SAE 316</u>	
Metal base 2: <u>ASTM A36</u>	
Metal de aporte: <u>ER 309 3/32"</u>	
DIMENSIONES	
Continuación de la tabla 6	
METAL BASE 1 (ESPECIFICACIONES)	
Tipo y grado: <u>ASTM A36</u>	
Análisis químico: <u>0.26 %C 0.4%Si</u>	
Propiedades Mecánicas: <u>R. a la tracción: 379 MPa Límite elástico: 206 Mpa, % de Elongación: 22%</u>	
METAL BASE 2 (ESPECIFICACIONES)	
Tipo y grado: <u>AISI 316</u>	
Análisis químico: <u>10.03%Ni 0.024 %C 16.01%Cr 2.02%Mo 0.483%Si 1.63 %Mn</u>	
Propiedades mecánicas : <u>R.a la tracción: 515 MPa Límite elástico: 205 Mpa, % de Elongación: 40%</u>	
METAL DE APORTE (ESPECIFICACIONES)	
Tipo y grado: <u>309L</u>	
Análisis químico: <u>13.9%Ni 0.02%C 23.7%Cr 0.04%Mo 0.51%Si 1.8 %Mn</u>	
Propiedades mecánicas: <u>R. a la tracción: 550 MPa % de Elongación: 30 %</u>	

(RESPALDO) ESPEFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)								
POSICIONES				TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA				
Posición de ranura:		<u>NA</u>		Temperaturas:		NA		
Progresión de soldadura:		<u>1G</u>		Tiempos:		NA		
Posición de filete:		<u>NA</u>						
PRECALENTAMIENTO				GAS				
Tiempo de precalentamiento mínimo :		<u>2-5 Minutos</u>		Protección: <u>Argón</u>				
Tiempo de precalentamiento máximo :		<u>NA</u>		Arrastre: <u>NA</u>				
Tiempo de precalentamiento :		<u>NA</u>		Respaldo: <u>NA</u>				
TÉCNICA								
Tipo de cordón:		<u>Longitudinal</u>						
Tamaño de orificio o taza de gas:		<u>NSPI</u>						
Limpieza inicial y entre pasos:		<u>SI</u>						
Método de cincelado posterior:		<u>NA</u>						
Oscilación:		<u>NA</u>						
Tipo de paso:		<u>NA</u>						
Electrodo o material de aporte:		<u>ER 309 3/32"</u>						
Velocidad de recorrido:		<u>NSPI</u>						
Martillado:		<u>NO</u>						
Otros:		<u></u>						
Capas de soldadura	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de recorrido	Otros
5	GTAW	ER 309	3/32"	CA	40-70 A	10 - 20 kV	--	--
OBSERVACIONES								
En la placa 3 se generó una falta de fusión en la raíz del cordón, para generar esta falta de fusión se utilizó corriente continua con polaridad directa que es de baja penetración y se varió la velocidad de desplazamiento para que el material de aporte no alcanzara a fundir completamente las caras de la raíz.								

Anexo C. Vista S-scan de Ultrasonido Por Arreglo de Fases

Vista S-scan en la que se pueden observar dos indicaciones orientadas transversalmente al cordón, una en la raíz de la soldadura y la segunda en la corona.



Anexo D. Dimensiones de indicaciones encontradas por Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial para la probeta 1.

INDICACIONES EVIDENCIADAS POR RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL							
	Indicación		Longitud	Distancia Axial			
	Grieta		140 mm	10 mm			
INDICACIONES EVIDENCIDAS ACOPLANDO DESDE EL ACERO AL CARBONO							
Indicación	Profundidad	Altura(mm)	Longitud(mm)	Indicación	Prof.(mm)	Altura.(mm)	Long.(mm)
1	0.69	3.3	8.5	9	4.69	2.58	3.69
2	1.92	2.08	6.14	10	5.25	2.54	3.9
3	0.17	1.73	2.34	11	5.57	2.08	3.19
4	0.5	2.23	2.81	12	4.9	2.27	3.43
5	0.69	2.71	3.56	13	5.91	2.42	3.59
6	0.52	2.78	3.75	14	5.91	2.42	3.59
7	0.61	4.1	5.14	15	5.96	2.98	4.27
8	0.69	2.18	2.7				
INDICACIONES EVIDENCIDAS ACOPLANDO DESDE EL ACERO INOXIDABLE							
Indicación	Profundidad	Altura(mm)	Longitud (mm)	Indicación	Prof.(mm)	Altura(mm)	Long.(mm)
1	5.22	1.95	2.2	7	1.38	2.32	3.02
2	4.08	2.61	2.81	8	2.16	2.57	3.24
3	2.52	1.87	2.19	9	1.91	2.78	3.53
4	3.86	2.65	3.1	10	1.64	3.61	4.37
5	5.91	2.07	2.23	11	2.16	3.03	3.83
6	1.57	2.2	2.72				

Anexo E. Dimensiones de indicaciones encontradas por Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial para la probeta 2.

INDICACIONES DETECTADAS MEDIANTE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL							
Indicación	Largo (mm)	Ancho (mm)	Distancia axial.(mm)	Indicación	Largo (mm)	Ancho (mm)	Distancia Axial (mm)
1	2	2	4	8	0.2	0.2	101
2	0.5	0.5	26	9	1	0.2	107
3	0.5	0.5	35	10	0.2	0.2	112
4	1	0.2	66	11	0.1	0.2	125
5	3	0.2	76	12	0.2	2	138
6	2	0.2	83	13	2	1	150
7	1	0.2	93				

INDICACIONES DETECTADAS DESDE EL ACERO AL CARBONO							
Indicación	Profundidad(mm)	Altura(mm)	Longitud(mm)	Indicación	Prof.(mm)	Altura(mm)	Long.(mm)
1	3.94	1.44	5.5	7	3.73	2.7	13.35
2	3.33	1.68	6.13	8	4.25	2.07	6.35
3	3.55	2.24	2.84	9	5.01	0	9.71
4	3.52	2.87	9.13	10	4.95	0	6.72
5	3.13	2.06	33.58	11	4.95	0	45.36
6	2.94	2.88	22.55				

INDICACIONES DETECTADAS ACOPLANDO DESDE EL ACERO INOXIDABLE							
Indicación	Profundidad(mm)	Altura(mm)	Longitud(mm)	Indicación	Prof.(mm)	Altura(mm)	Long.(mm)
1	5.25	1.16	3.69	4	5.35	1.85	41.66
2	5.41	1.07	7.73	5	4.7	0.96	4.92
3	5.51	1.41	11.88				

Anexo F. Dimensiones de indicaciones encontradas por Ultrasonido por Arreglo de Fases y Radiografía Industrial para la probeta 3.

INDICACIONES DETECTADAS POR RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL							
Indicación		Longitud		Distancia Axial			
Fata de penetración		150 mm		0 mm			
INDICACIONES DETECTADAS DESDE EL ACERO AL CARBONO							
Indicación	Profundidad(mm)	Altura(mm)	Longitud(mm)	Indicación	Prof.(mm)	Altura(mm)	Long(mm)
1	5.96	2.45	118	4	3.47	2.31	9.94
2	2.35	2.47	12.75	5	3.64	2.27	7.18
INDICACIONES DETECTADAS ACOPLANDO DESDE EL ACERO INOXIDABLE							
Indicación	Profundidad(mm)	Altura(mm)	Longitud(mm)	Indicación	Prof.(mm)	Altura(mm)	Long(mm)
1	5.3	1.35	126.53				

Anexo G. Indicaciones en la raíz de la probeta 1.

