

DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO DE SOLDADURA (WPS) PARA
JUNTAS DE POSTES DE ALUMBRADO PÚBLICO.

PEDRO PABLO MANJARRES RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2022

DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO DE SOLDADURA (WPS) PARA
JUNTAS DE POSTES DE ALUMBRADO PÚBLICO.

PEDRO PABLO MANJARRES RODRÍGUEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Directora

KATERIN OSORIO BARRERA
Ing. Mecánica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2022

21/01/2022

PEDRO PABLO MANJARRÉS RODRÍGUEZ

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en ésta o en cualquiera otra universidad”. Art. 92, parágrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

Firma del autor (es)

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to read 'Pedro Pablo Manjarrés Rodríguez'. Below the signature, the name 'pedro pablo manjarrés' is written in a smaller, less stylized font.

Le dedico este arduo trabajo realizado a mi padre Pedro Antonio Manjarrés Romero, a mi madre Rubiela Del Carmen Rodríguez Martínez por el apoyo moral e incondicional que tuvieron conmigo a la hora de estar siempre pendiente de mí, las noches que dormía tarde pegado a mi computador, días de estrés y de ansiedad que se traducen en el sacrificio de poder cumplir mi objetivo y culminar con éxito este bonito trabajo de grado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todo el grupo de docentes de la Universidad Pontificia bolivariana por haberme transmitido todo su conocimiento en pro de enseñarme todo lo necesario para poder ser un excelente profesional en el área de la ingeniería mecánica, por sus consejos y críticas constructivas, por su profesionalismo y su don de enseñanza. A todos los compañeros que me apoyaron moralmente y con los que aprendí a trabajar en equipo, muchas gracias por todo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. OBJETIVOS	14
1.1. GENERAL	14
1.2. ESPECÍFICOS	14
2. MARCO TEÓRICO/ESTADO DEL ARTE	15
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
2.2. SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO SMAW.....	17
2.2.1. El arco	18
2.2.2. El metal de aporte	18
2.2.3. Fundente	18
2.2.4. Ventajas y desventajas de la soldadura SMAW	19
2.2.5. Proceso de la soldadura SMAW	19
2.2.6. Cebado del arco	20
2.2.7. Trazado del cordón de soldadura	20
2.2.8. Longitud del arco	21
2.2.9. Refuerzo de la soldadura.....	21
2.2.10. Avance del electrodo.....	21
2.2.11. Reemplazo del electrodo.....	21
2.2.12. Secuencia para reemplazo del electrodo	21
2.2.13. Juntas con bisel o chaflán:	22
2.2.14. Medidas para protección personal	23
2.2.15. Equipo de soldadura SMAW	24
2.2.16. Electrodo.....	24
2.2.17. Defectos de soldadura.	25
2.2.18. Dureza.	26
2.2.19. Desgarre.....	26
3. METODOLOGÍA.....	27
3.1. FASE 1: DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SOLDADURA PARA LA FABRICACIÓN DE POSTES PARA EL ALUMBRADO PÚBLICO.....	27
3.2. FASE 2: EVALUACIÓN DE LAS JUNTAS SOLDADAS POR MEDIO DE ENSAYOS DE LÍQUIDOS PENETRANTES PARA IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS SIGUIENDO LA NORMA ASTM-E165: 2018.....	29
3.3. FASE 3: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA SUPERFICIAL DE LA JUNTA SOLDADA POR MEDIO DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS (ED).....	31

3.3.2.	Ensayo destructivo de flexión o desgarre	33
3.4.	FASE 4: GENERACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO DE SOLDADURA WPS, PARA LA FABRICACIÓN DE TUBOS DE ALUMBRADO PÚBLICO.	34
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1.	DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SOLDADURA PARA LA FABRICACIÓN DE POSTES PARA EL ALUMBRADO PÚBLICO	36
4.2.	EVALUACIÓN DEL ESTADO SUPERFICIAL DE LA JUNTA SOLDADA POR MEDIO DE LÍQUIDOS PENETRANTES PARA IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS SIGUIENDO LA NORMA ASTM-E165: 2018.....	39
4.3.	EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA SUPERFICIAL DE LA JUNTA SOLDADA POR MEDIO DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS (ED).....	47
4.3.1.	Prueba de dureza (Ensayo Brinell)	47
4.3.2.	Ensayo de Flexión o dobléz.....	50
4.4.	GENERACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO DE SOLDADURA WPS, PARA LA FABRICACIÓN DE TUBOS DE ALUMBRADO PÚBLICO TENIENDO EN CUENTA RANGOS DE OPERACIÓN DE VARIABLES DE LAS PROBETAS Y SU CARACTERIZACIÓN	55
5.	CONCLUSIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura No 1 Diagrama esquemático del proceso de soldadura, Fuente: ITW Welding product grup	18
Figura No 2 Elementos básicos del proceso de soldadura SMAW, fuente: Rev. Máquinas y herramientas.....	19
Figura No 3 Elementos básicos del proceso de soldadura SMAW, fuente: Rev. Máquinas y herramientas.....	20
Figura No 4 Variaciones de bisel. Fuente: Manual de soldadura INDURA (2002).....	22
Figura No 5 Ángulos de bisel vs chaflán. Fuente: Módulo No.4 geometría de las juntas de soldadura y simbología de soldadura.....	23
Figura No 6 Equipo básico de soldadura, Fuente: ITW WELDING PRODUCT GRUP	24
Figura No 7 Equipo de soldadura, Fuede: INFRA (2020).....	24
Figura No 8 Clasificación AWS A5.1 para electrodos. Fuente: ITW Welding Product Grup	25
Figura No 9 Fases para la fabricación de postes de alumbrado público. Fuente: elaboración propia	27
Figura No 10 Inspección por líquidos penetrantes. Fuente: Elaboración propia	30
Figura No 11 Líquidos penetrantes. Fuente: Trytech (2011)	31
Figura No 12 Puntos de aplicación del ensayo de dureza Brinell. Fuente: Gonnella (2013	33
Figura No 13 Limpieza y unión de bisel antes de aplicar soldadura	39
Figura No 14 Trazado de cordón de soldadura, posición plana	39
Figura No 15 Tintas Penetrantes	40
Figura No 16 Probetas soldadas listas para ensayos ED y END	40
Figura No 17 Aplicación de líquido limpiador	40
Figura No 18 Aplicación de líquido penetrante.....	40
Figura No 19 Aplicación de líquido revelador.....	41
Figura No 20 Probeta 1 soldada y limpia, lista para ensayo.....	42
Figura No 21 Probeta 1 evaluada por inspección visual.....	42
Figura No 22 Probeta 2 soldada y limpia, lista para ensayo.....	43
Figura No 23 Probeta 2 evaluada por inspección visual.....	43
Figura No 24 Probeta 3 soldada y limpia, lista para ensayo.....	44
Figura No 25 Probeta 3 evaluada por inspección visual.....	44
Figura No 26 Probeta 4 soldada y limpia, lista para ensayo.....	45
Figura No 27 Probeta 4 evaluada por inspección visual.....	45
Figura No 28 Probeta 5 soldada y limpia, lista para ensayo.....	46
Figura No 29 Probeta 5 evaluada por inspección visual.....	46
Figura No 30 Toma de muestras material inicial. Fuente: Elaboración propia	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Composición química del material de aporte.....	15
Tabla 2 Tabla 2 Fuente: Elaboración propia de los autores con base en manual de herramientas y máquinas (2018).....	19
Tabla 3 Resistencia a la tensión según designación, Fuente: ITW WELDING PRODUCT GRUP	25
Tabla 4 . Posiciones de soldadura. Fuente: ITW WELDING PRODUCT GRUP	25
Tabla 5 Defectos de soldadura. Fuente: Elaboración Propia.....	26
Tabla 6 Equipos para utilizar. fuente: Elaboración propia	29
Tabla 7 Equipos para ensayo destructivo de dureza.....	32
Tabla 8 Equipo para ensayo destructivo de flexión o desgarre. fuente: Elaboración propia	34
Tabla 9 Calificación de ensayos no destructivos (END). Fuente: Elaboración propia.....	35
Tabla 10 Calificación de ensayos destructivos (ED). Fuente: Elaboración propia	35
Tabla 11 Requisitos de las láminas y platinas postes de alumbrado público Fuente: Manual Técnico CODENSA (2020).....	36
Tabla 12 Parámetros de soldeo. Fuente: Manual de Soldadura INDURA (2002)	37
Tabla 13 Cuadro de variables esenciales y no esenciales estándar. Fuente: Elaboración propia	37
Tabla 14 Variables probeta No.1	38
Tabla 15 Variables probeta No.2	38
Tabla 16 Variables probeta No. 3.....	38
Tabla 17 Variables probeta No.4	38
Tabla 18 Variables probeta No.5	39
Tabla 19 Inspección por END Probeta 1. Fuente: Elaboración propia.....	42
Tabla 20 Calificación END Probeta 1. Elaboración Propia	42
Tabla 21 Inspección por END probeta 2. Fuente: Elaboración propia	43
Tabla 22 Calificación de ensayos no destructivos (END) Probeta No.2. Fuente: Elaboración Propia	43
Tabla 23 Inspección por END probeta 3. Fuente: Elaboración propia	44
Tabla 24 Calificación de ensayos no destructivos (END) Probeta No. 3. Fuente: Elaboración Propia	44
Tabla 25 Inspección por END probeta 4. Fuente: Elaboración propia	45
Tabla 26 Calificación de ensayos no destructivos. Probeta No. 4. Fuente: Diseño propio con base en ensayos de laboratorio	45
Tabla 27 Inspección por END probeta. Fuente: Elaboración propia.....	46
Tabla 28 Calificación de ensayos no destructivos (END). Probeta No. 5. Fuente: Diseño propio con base en ensayos de laboratorio.....	46
Tabla 29 Muestras probeta inicial. Fuente: Elaboración Propia.....	47
Tabla 30 Datos obtenidos por ensayo Brinell. Fuente: elaboración propia	49
Tabla 31 Calificación de ensayos destructivos (ED). Probeta No.1. Fuente: Elaboración propia	49
Tabla 32 Calificación de ensayos destructivos (ED), Probeta No.2. Fuente: Elaboración propia	49
Tabla 33 Calificación de ensayos destructivos (ED), probeta No.3. Fuente: Elaboración Propia	50
Tabla 34 Calificación de ensayos destructivos (ED), probeta No.4. Fuente: Elaboración Propia	50

Tabla 35 Calificación de ensayos destructivos (ED), probeta No.5. Fuente: Elaboración Propia	50
Tabla 36 Resumen Resultados obtenidos Ensayo Brinell en probetas evaluadas. Fuente: Elaboración propia	50
Tabla 37 Datos obtenidos probeta No.1 ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia ..	51
Tabla 38 Datos obtenidos probeta No.2 ensayo de flexion. Fuente: Elaboracion Propia..	52
Tabla 39 Datos obtenidos probeta No.3 ensayo a flexión. Fuente: Elaboración Propia....	53
Tabla 40 Datos obtenidos probeta No.4 ensayo a flexión. Fuente: Elaboración Propia....	54
Tabla 41 Datos obtenidos probeta No.5 ensayo a flexión. Fuente: Elaboración Propia....	54
Tabla 42 Calificación de ensayo de flexión. Fuente: Elaboración Propia	54
Tabla 43 Resumen de calificación de ensayos. Fuente: Elaboración Propia.....	55
Tabla 44 Descripción Variables Soldadura Probeta 1	55
Tabla 45 Procedimiento específico de soldadura (WPS) para postes de alumbrado público. Fuente: Elaboración Propia	56

RESUMEN

Uno de los procesos de manufactura más utilizados en la industria metalmecánica es la soldadura, que consiste en la unión de dos o más piezas de un material, usualmente a través de la fusión de este o por medio de otro material de aporte, el cual, al enfriarse, se convierte en una unión fija. En el sector metalmecánico existen empresas que se dedican a la fabricación de tubos soldados y galvanizados, las cuales utilizan procesos de soldadura regidos por normas nacionales e internacionales. Existen también otras empresas que adquieren esos tubos y los transforman en productos comerciales de diversa utilidad, siendo en ambos casos las normas y los procedimientos específicos, los elementos fundamentales para lograr acabados competitivos y de excelente calidad. En la región se encuentra la empresa REMEC SAS, que se dedica a transformar los tubos galvanizados que adquiere en el mercado en postes para alumbrado público. En esa transformación se utilizan procesos de soldadura y agregado de materiales. El problema radica en que dicha empresa no cuenta con un procedimiento estándar para la soldadura (WPS) que les permita lograr niveles de calidad deseables y que permitan optimizar los procesos para mejorar su rentabilidad. El presente trabajo pretende determinar cómo se están realizando estos procesos, con el fin de caracterizarlos y desarrollar un procedimiento específico de soldadura o WPS. Para ello se determinarán las variables más importantes involucradas en el proceso de soldadura de la junta soldada de los postes metálicos de alumbrado público, en tubería de acero galvanizado en caliente con diámetro de Ø3”.

INTRODUCCIÓN

El uso de tubos galvanizados es una opción muy utilizada en el desarrollo de productos metalmecánicos, debido a sus características de bajo costo, resistencia a las condiciones ambientales y buen comportamiento en su impacto ambiental. Por esta razón, se vienen utilizando los postes de acero galvanizado en caliente para su uso en el alumbrado público. Ante esto hay que señalar que, el reglamento técnico de iluminación y alumbrado público, RETILAP 2017 del Ministerio de Minas y Energía, establece los requisitos de seguridad, desempeño y compatibilidad de los postes de uso exclusivo para alumbrado público. Dentro de las normas definidas en este reglamento técnico, se encuentran normas tanto nacionales, como internacionales. En la sección 390 se definen las características de estos postes en cuanto a geometría, materiales, requerimientos de instalación, condiciones de uso, e inclusive las normas que regulan los ensayos a que deben ser sometidos para garantizar las condiciones de seguridad y los principios de eficiencia económica y técnica que deben tener este tipo de estructuras (Ministerio de Minas y Energía, 2017, p. 14).

Por otro lado, para fabricar los postes de alumbrado público, se hace necesario agregar una placa metálica cuadrada debidamente soldada y reforzada en uno de los extremos del tubo galvanizado, la cual servirá de base soporte al poste. Al soldar acero galvanizado, la capa de zinc se oxida, derrite, evapora e incluso volatiliza en la superficie del bisel y los bordes en el calor del arco, causando fácilmente los poros de la soldadura, razón por la cual es de vital importancia verificar la calidad de la soldadura al terminar el proceso de fabricación del poste de alumbrado (ENEL-CODENSA, 2011)

En lo que respecta a la ciudad de Montería, REMEC SAS, es la única empresa fabricante de postes de alumbrado público, sin embargo, la empresa no cuenta con un procedimiento específico de soldadura, por lo que en el producto se pueden evidenciar deficiencias en las juntas soldadas, sobre todo en la base del poste y otros detalles como daños mecánicos y oxidación en la unión del tubo soldado a la placa base y sus refuerzos.

Con base en lo anterior es importante plantearse la siguiente pregunta de investigación, ¿Cómo establecer un procedimiento específico de soldadura (WPS), para la empresa Remec SAS, a partir de las variables que más influyen en el proceso de electrosoldadura para la fabricación de postes de acero galvanizado para alumbrado público?

La principal importancia de la presente investigación radica en generar un procedimiento específico de soldadura o WPS para las juntas soldadas generadas en la fabricación de postes de alumbrado público manufacturados por la empresa REMEC SAS, de tal forma que establezca cómo realizar el proceso de soldadura de forma eficiente y efectiva y así se podrá evitar los resultados no deseados, redundando en una mejora considerable en la aplicación del producto así como en los procedimientos de aplicación, una minimización de los daños mecánicos y una disminución en los reclamos de garantías dados por los clientes; por ende se podrá lograr un incremento significativo de la rentabilidad del producto aprovechando la ventaja competitiva con la que cuenta la empresa.

De igual manera, se suma el hecho de que para este tipo de procedimientos es necesario tener claridad en los protocolos de aplicación cumpliendo con los estándares tanto nacionales como internacionales, por lo que queda plenamente justificado en la investigación, ya que ello redundará en las mejoras en un área que tiene importancia en la

región, cumpliendo de esta manera el objetivo principal de la universidad y afianzando la relación Empresa - Academia, a través de la solución de problemas de la industria.

La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), se ha caracterizado por formar profesionales integrales con excelente formación académica y práctica, en donde convergen los resultados del trabajo disciplinado de docentes y estudiantes. En el caso particular de este proyecto de grado, el autor cuenta con diferentes cursos para su desarrollo, como es el caso de los cursos de materiales, procesado de metales, procesos de manufactura, resistencia, entre otros.

Así mismo, la UPB cuenta con instalaciones idóneas para el desarrollo de prácticas, como lo son el laboratorio de máquinas y los talleres de herramientas y soldaduras, donde se encuentran los equipos necesarios para implementar los procedimientos que sean necesarios. Y no menos importante, se cuenta con la colaboración de docentes capacitados y dispuestos a colaborar en el desarrollo de nuevas experiencias de los estudiantes.

Por tal motivo, se considera pertinente el tema seleccionado para el trabajo de grado, en la medida que ayuda a fortalecer las competencias teóricas y prácticas que contribuirán al desarrollo de un profesional competente en el área de ingeniería mecánica, capaz de ofrecer soluciones adecuadas a problemas del contexto.

Con relación al impacto esperado, se espera que la empresa ponga en práctica el procedimiento de soldadura diseñado, se espera que se presente una mejora significativa en la calidad de los productos ofrecidos por el fabricante, y un mejoramiento en el proceso de fabricación, generando así un aporte a favor de la economía de la región.

En cuanto a las limitaciones del proyecto, se hace necesario especificar que solo se evaluarán las propiedades mecánicas de flexión aplicadas en juntas soldadas de tubos de acero galvanizado de diámetro de $\varnothing 3$. Así mismo se hará la caracterización de variables involucradas en el proceso para establecer los rangos de operación. Por otra parte, se hará uso de los laboratorios de la universidad, en función de las posibilidades y disponibilidad de estos.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

- Diseñar un procedimiento específico de soldadura (WPS) del proceso de soldadura SMAW para la fabricación de postes metálicos de alumbrado público en tubería acero ASTM-A53 galvanizada en caliente.

1.2. ESPECÍFICOS

- Determinar las variables que influyen en el proceso de soldadura y realizar probetas teniendo en cuenta la muestra de materiales de postes metálicos de alumbrado público ASTM-A53 de 3 pulgadas y la norma AWS D1.1.
- Evaluar el estado superficial de la junta soldada por medio de líquidos penetrantes para identificación de defectos siguiendo la norma ASTM-E165: 2018.
- Evaluar la resistencia superficial de la junta soldada por medio de ensayos destructivos (ED) de dureza (ensayo Brinell) siguiendo la norma ASTM-E10 y resistencia al desgarre de acuerdo con ensayo a flexión según norma ASTM-E8/8M.
- Generar el procedimiento específico de soldadura WPS, para la fabricación de tubos de alumbrado público teniendo en cuenta rangos de operación de variables de las probetas y su caracterización.

2. MARCO TEÓRICO/ESTADO DEL ARTE

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Par iniciar la revisión bibliográfica de antecedentes, se tuvieron en cuenta tres criterios clave: el procedimiento específico de soldadura (WPS), el proceso de soldadura SMAW y los procesos de soldadura en postes de alumbrado público. Partiendo de ello, Batista (2015); establece en una de sus investigaciones, determinar la relación microestructura - propiedades en la zona fundida y en la zona de influencia térmica de un acero bajo aleado al manganeso unido mediante el proceso de soldadura bajo arco sumergido.

La metodología utilizada en este estudio se enmarcó en la investigación cuantitativa de tipo investigación aplicada, en donde el proceso de soldadura se dio sobre la sección de la tubería preparada para ello, colocando la tenaza de soldadura a un ángulo aproximado de 90° con respecto a la base de metal y con una distancia pieza electrodo de 3mm. El material empleado para la elaboración parte de la composición que se aprecia en la Tabla 1, que se clasifica según la norma AWS: F 48 A0 – EL – 12.

Tabla 1 Composición química del material de aporte

C %	Mn %	Si %	P %	S %	Ni %	Mo %	Cr %
0,05	1,20	0,55	0,01	0,006	0,02	< 0,01	0,01

Fuente: Batista (2015)

Se concluye que a través de la metodología utilizada se puede determinar el ciclo térmico de soldadura en relación con las transformaciones de fase ocurridas en la unión que es soldada manualmente por arco eléctrico. Los procedimientos de clasificación empleados por el autor cumplen con lo establecido en la norma AWS: F 48 A0–EL–12.

También, en Ecuador Manosalvas y Chachas (2015) realizaron otra investigación enfocada en diseñar y construir un equipo didáctico de soldadura por arco sumergido; los autores exponen que este tipo de soldadura se caracteriza por su gran penetración en una sola pasada, aprovechando las propiedades tanto del alambre (aleaciones Mg) y del fundente (p. 1). La metodología utilizada es cualitativa-descriptiva. Los resultados muestran que el 20% del uso de la soldadura, en el sector eléctrico es para postes de acero y se recomienda como la alternativa que más se ajusta a lo que necesita el diseño y construcción es el equipo utilizado en el proceso SAW para soldadura horizontal plana. Las conclusiones establecen que cuando la intensidad de la soldadura es mayor las características del fundente pueden dejar de ser aptas para fusionar el metal de aporte y aumenta el cordón de soldadura. También se estableció que la construcción del equipo didáctico de soldadura por arco sumergido sirve de apoyo para la enseñanza y comprensión práctica de la soldadura.

En tercer lugar, se encontró un estudio en Perú, publicado por Julcapari (2013), cuyo objetivo general fue describir mediante normas las características de la planeación en procedimiento de soldadura para mejorar uniones soldadas en aceros ASTM A36 en una empresa peruana. La metodología utilizada fue de tipo investigación aplicada. Los resultados muestran que las uniones soldadas de aceros ASTM A36 mejora luego de

aplicar el planeamiento en sus procedimientos. Se concluye que los ensayos no destructivos de tintas penetrantes muestran que aun cuando hay una disminución de socavaciones en la soldadura después de implementar la propuesta, esta no implica que no haya fisuras ni agrietamientos dentro de la soldadura. Sin embargo, la estandarización del procedimiento optimiza los resultados.

Además de ello, se encontró otra investigación en Chile, realizada por Sánchez (2005) bajo el objetivo de promover a los profesionales que participan directa o indirectamente en los procesos de fabricación o armado, los aspectos técnicos básicos para un buen uso tanto del proceso SMAW, como también del aprovechamiento de electrodos. El autor explica que el proceso de soldadura por arco de metal protegido (SMAW) posee amplias ventajas, entre las que señala que el equipo es relativamente sencillo y portátil y que no se requiere protección con gas auxiliar ni un fundente granular. Sin embargo, muestra entre las desventajas que este proceso no suelda metales de bajo punto de fusión como el plomo, estaño, zinc y sus aleaciones; así mismo, que un amperaje excesivo puede sobrecalentar el electrodo porque su núcleo posee una resistencia eléctrica. Se concluye que el proceso SMAW es uno de los más utilizados por su bajo costo, pero es importante señalar que los buenos resultados dependen de la calidad de conocimientos que poseen las personas que lo desarrollan, puesto que el profesional debe estar capacitado para crear procedimientos necesarios y dar instrucciones precisas.

A nivel nacional, Walteros (2012) realizó una investigación con el propósito de desarrollar una revisión del estado del arte de los procesos de soldadura involucrados en el montaje de tubería API 5 L para transporte de hidrocarburos. La metodología se centra en la investigación descriptiva, haciendo especial uso de la revisión bibliográfica. Los resultados de los análisis metalográficos y los ensayos mecánicos de tracción, dureza e impacto de las juntas soldadas revelaron la influencia de los consumibles de soldadura y del metal base en las propiedades de las uniones. Las conclusiones muestran que el proceso SMAW tiene mayor confiabilidad que el proceso GMAW en la soldadura de tuberías, ya que en los ensayos de radiografía y doblado las muestras correspondientes no presentaron ningún tipo de fallas.

Otro estudio es el de Morato (2012), el cual se desarrolló con el objetivo de realizar el análisis de los procesos de soldadura aplicados en cuatro empresas de la ciudad de Bogotá, dedicadas a la fabricación de los cuerpos de los carrotanques en acero al carbono para el transporte de crudo.

La metodología es cualitativa y centrada en la revisión y análisis de bibliografía y el estudio de caso de cuatro empresas. Para desarrollar la investigación primero se hizo la revisión bibliográfica y posteriormente se hizo la visita a las cuatro empresas, en estas visitas se realizó el levantamiento de la información de los procesos de soldadura, luego se hizo el informe final donde se realiza un análisis detallado de la información. Los resultados dejan ver que, tres de las cuatro empresas usan el proceso GMAW y una de ellas usa el proceso SMAW. Se concluye que la empresa que tiene un mayor costo consumible por kg es la empresa que emplea el proceso SMAW. Al emplear el proceso GMAW en tres de las cuatro empresas, se obtiene alta eficiencia en el proceso de aplicación, dado que no es necesario hacer interrupciones para cambiar los electrodos.

Por otro lado, Bolaños, Rivas y Coronado (2006), realizaron un estudio cuyo objetivo es

analizar las propiedades mecánicas y las características microestructurales de los materiales de aporte y la zona afectada térmicamente (ZAT) de tres procedimientos de soldadura de arco eléctrico, usados para la recuperación de ejes desgastados de molinos de caña de azúcar. La metodología se centra en la caracterización de las soldaduras utilizadas para reparar ejes fisurados o con desgaste, y para ello, se utilizaron tres procedimientos de soldadura en un eje de 0,46 m de diámetro. Los dos primeros fueron procedimientos de soldadura de arco sumergido (SAW) y el último fue un procedimiento de soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW). Los resultados muestran que los dos primeros procesos (SAW), la estructura que se encontró fue la ferrita con disgregación de perlita de grano pequeño. Sin embargo, la ZAT que presenta mayor energía de impacto (CVN) es la del primer procedimiento, con una magnitud de 47,58Nm.

Se concluyó que el procedimiento de soldadura A, es el recomendado para realizar la recuperación de ejes. Este procedimiento de soldadura A, equivale al proceso SAW, materiales depositados: material de aporte 1 (A-MA 1) y material de aporte 2 (A-MA 2), alambre tubular de 3/32" de diámetro, velocidad periférica de 65 cm/min, 490A, 29 V y stick out de 3,8 cm. Información suministrada por el fabricante: A-MA 1. Composición química: %C = 0,08, %Mn = 0,8, %Cr = 12,5, %Si = 0,4. Dureza esperada del depósito: 265-303 BHN (27-32 HRC). A-MA 2. Composición química: %C = 0,09, %Mn = 0,8, %Cr = 0,45, %Ni = 0,55, %Mo = 0,15, %Si = 0,3. Dureza esperada del depósito: 219-228 BHN (18-20 HRC).

2.2. SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO SMAW.

Considerado como uno de los procesos de unión de metales más antiguo, este tipo de soldadura data de los años 90 del siglo XVIII, donde se utilizaba un electrodo de carbón para generar un arco eléctrico, más no fue sino hasta el año 1907, cuando Oscar Kjellberg fundador de ESAB, a través de varios ensayos logra consolidar el método de soldadura con electrodo recubierto igualmente conocido por sus siglas en inglés como SMAW (Shielded Metal Arc Welding).

Dicho método de hecho fue pionero en la aplicación con exitosos resultados de orden económico y técnico, permitiendo desarrollar eficaces procesos de fabricación que solo han sido superados hoy en día por aplicaciones modernas y de vanguardia que sin embargo se basan aún en el concepto básico de la soldadura al arco con electrodo auto protegido (Florez, 2017).

Técnicamente en este tipo de soldadura 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). Podemos visualizar el proceso en la figura No. 1, la cual muestra el diagrama esquemático del proceso de soldadura mostrando los diferentes componentes del proceso:

- 1-. Electrodo
- 2-. Atmosfera de protección
- 3-. Escoria
- 4-. Metal base
- 5-. Metal fundido del núcleo del electrodo
- 6-. Depósito de soldadura o cordón de soldadura

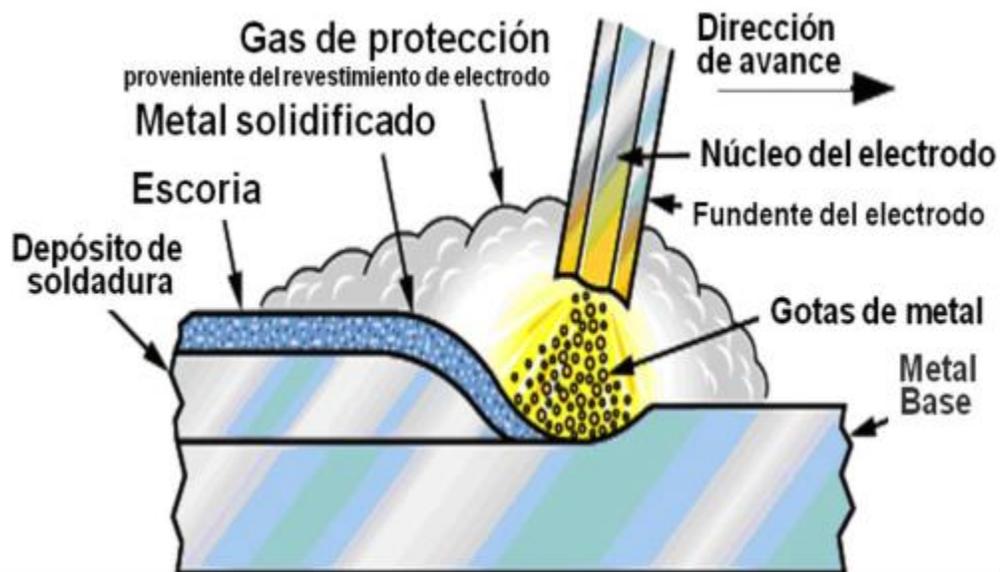


Figura No 1 Diagrama esquemático del proceso de soldadura, Fuente: ITW Welding product grup

Los elementos que componen el proceso de soldadura SMAW cumplen una importante función, la cual puede resumirse de la siguiente manera:

2.2.1. El arco

Todo proceso de soldadura inicia precisamente por la formación del arco, establecido este el fundente y el metal de aporte que lo recubre empiezan a consumirse. La fuerza del arco aporta por tanto la acción de excavar el metal base para lograr la penetración deseada, continuando el proceso a medida que la soldadura es ensanchada y el electrodo logra avanzar a través de la pieza trabajada (Maquinas & Herramientas, 2018).

2.2.2. El metal de aporte

Su función al derretirse es formar gotas para que se depositen sobre la pieza trabajada y formen el charco de soldadura, llenando el espacio de soldadura y uniendo las piezas en una junta de soldadura.

2.2.3. Fundente

Se derrite al tiempo con el metal de aporte y al formar un gas y una capa de escoria protegen al charco de soldadura y el arco, limpiando igualmente la superficie metálica y suministrando algunos elementos de aleación a la soldadura, su función es también proteger el metal fundido contra la oxidación logrado estabilizar el arco y por último se procede a retirar después de la solidificación. En el proceso se detallará adelante cada una de las acciones desarrolladas y los parámetros técnicos necesarios, en la figura No. 2 se muestran a detalle cada uno de los elementos que conforman el proceso de soldadura SMAW:



Figura No 2 Elementos básicos del proceso de soldadura SMAW, fuente: Rev. Máquinas y herramientas

2.2.4. Ventajas y desventajas de la soldadura SMAW

Demostrada su eficiencia podemos, sin embargo, enunciar en la Tabla No. 2 a continuación diferentes ventajas y desventajas de la soldadura SMAW:

Ventajas	Desventajas
El equipo es simple, portátil y de bajo costo	Dada la longitud limitada de los electrodos el proceso es discontinuo
Se aplica a una gran variedad de metales, electrodos y posiciones de soldadura	Debido a que es un proceso manual, se requiere de gran pericia por parte del soldador.
Las tasas de deposición de metal son relativamente altas	La soldadura suele contener inclusiones de escoria
Es muy adecuada para las aplicaciones en exteriores	Los humos suelen dificultar el proceso de soldadura

Tabla 2 Fuente: Elaboración propia de los autores con base en manual de herramientas y máquinas (2018)

2.2.5. Proceso de la soldadura SMAW

En términos generales consiste en la utilización de un electrodo con un recubrimiento determinado de acuerdo con las características específicas y a través de este se hará circular un tipo determinado de corriente eléctrica (directa o alterna). Al darse un corto circuito entre el electrodo y el material base que desea soldarse, el arco eléctrico puede alcanzar temperaturas hasta de 5.500 grados Celsius por lo cual el núcleo del electrodo fundido se deposita en el material soldado y por medio de la combustión del recubrimiento, una atmósfera protege al proceso para evitar la penetración de la humedad y algunos posibles elementos contaminantes que se adhieran, la escoria generada igualmente recubre el cordón de soldadura que se produce en el proceso.

Una vez se haya seleccionado el electrodo revestido, que depende básicamente del espesor y tipo de la pieza de trabajo, las características y la posición de la soldadura que desee obtenerse se debe limpiar perfectamente la pieza de trabajo con un cepillo de acero con el fin de eliminar todas las partículas de grasa, óxido o en general cualquier suciedad presente. Una vez las piezas se encuentren limpias se sigue una serie de pasos los cuales se detallan a continuación:

2.2.6. Cebado del arco

Para realizar una soldadura SMAW, se hace necesario en primer lugar encender o establecer el arco lo cual se conoce también como «cebado», cuyo principio básicamente es efectuar un choque en la punta del electrodo con la pieza de trabajo o metal, el cual puede realizarse de dos maneras diferentes, como es mostrado en la figura 3:

- Por golpe, golpeando el metal y levantando el electrodo
- Por raspado, similar a encender un fósforo, se trata de deslizar el electrodo por el metal con una inclinación leve.

En ambos casos, el arco debe formarse y permanecer estable. Cuando se logra la estabilidad, ya está cebado y puede comenzarse con la soldadura.

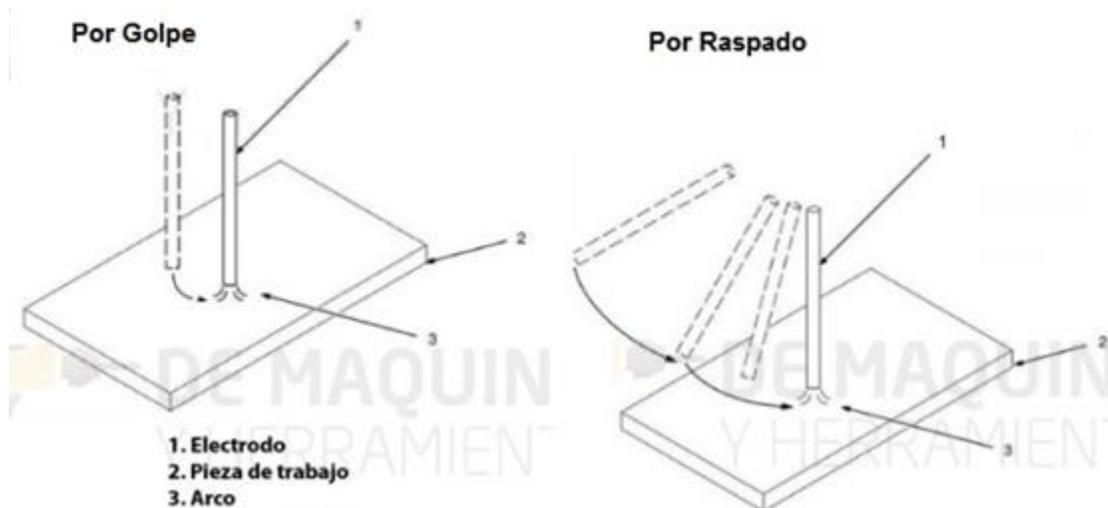


Figura No 3 Elementos básicos del proceso de soldadura SMAW, fuente: Rev. Máquinas y herramientas

2.2.7. Trazado del cordón de soldadura

En este paso se dirige el electrodo al punto de inicio de la soldadura, procurando en todo caso que la distancia entre el electrodo y la pieza sea constante y de aproximadamente el diámetro del electrodo. Para saber si debe elegirse entre cordones oscilantes y rectos dependerá de las exigencias del procedimiento y del tipo de cordón:

- Cuando la separación en la raíz no es muy amplia deben efectuarse las primeras pasadas con cordones rectos.
- En caso de que la unión tenga una excesiva separación de la raíz, las pasadas iniciales se depositarán dando además del movimiento oscilante, un leve vaivén de avance y retroceso del electrodo, lo cual da un tiempo adecuado para que se solidifique el charco

de soldadura evitando la caída del material fundido.

2.2.8. Longitud del arco

Debe, la mantenerse siempre lo más constante posible entre 2 y 4 mm de longitud dependiendo del espesor del electrodo operación debe realizarse acercando el electrodo uniformemente a medida que se consume hacia la pieza y a lo largo de la junta en la dirección de la soldadura.

2.2.9. Refuerzo de la soldadura

En caso de que se quiera reforzar la soldadura deben depositarse varios cordones paralelos cuya separación entre si debe ser de 8 a 10 mm, se retira la escoria y se deposita una nueva pasada entre los cordones.

2.2.10. Avance del electrodo

Debe en lo posible ser uniforme, debido a que de esta actividad depende la calidad y el aspecto general de la soldadura, procurando que exista siempre una distribución uniforme del calor. Una buena soldadura se caracteriza por que el arco ha estado en sucesivo y continuo contacto a lo largo de la línea de soldadura, de darse un desplazamiento rápido o irregular pueden obtenerse partes con penetración escasa o porosa. La intensidad de la corriente empleada repercute igualmente en la penetración deseada, si la corriente es baja la pieza no se calienta lo suficiente y si es demasiado elevada se formará un cráter muy grande que podría perforar o quemar la pieza.

2.2.11. Reemplazo del electrodo

Al culminar el proceso de soldadura o ante la necesidad de reemplazar el electrodo consumido, nunca se debe interrumpir el arco de forma abrupta lo cual podrá ocasionar defectos irreversibles en la soldadura, se puede interrumpir correctamente el arco:

- Acortando el arco rápidamente y deslazando el electrodo lateralmente fuera del cráter, esto en el caso de reemplazar el electrodo ya consumido para continuar la soldadura desde el cráter.
- Otra forma es detener el movimiento de avance del electrodo, permitiendo el llenado del cráter para luego si retirar el electrodo.
- Igualmente puede darse al electrodo una inclinación contraria a la que llevaba, retrocediendo unos 10-12 mm, sobre el mismo cordón, antes de interrumpir el arco; de esta forma se rellena el cráter.

2.2.12. Secuencia para reemplazo del electrodo

Al reemplazar el electrodo debe tenerse en cuenta los pasos a seguir:

- Interrupción del arco.
- Remoción o descascarillado de la escoria con un martillo apropiado.
- Limpieza con cepillo de acero para permitir la correcta deposición del próximo cordón de soldadura.
- Reemplazo del electrodo.

- Nueva operación de cebado del arco y así sucesivamente.

2.2.13. Juntas con bisel o chaflán:

Para unir dos (2) piezas, generalmente es necesario preparar un bisel o chaflán en el cual se depositará la soldadura, esto con el fin de que la soldadura se deposite en una mayor área y garantizar así mejor ensamble entre las dos piezas. En la figura 4 se muestra los tipos de partes y nombres que reciben el ensamble con chaflán y en la figura 5 se muestran las diferencias entre los ángulos de bisel y de chaflán

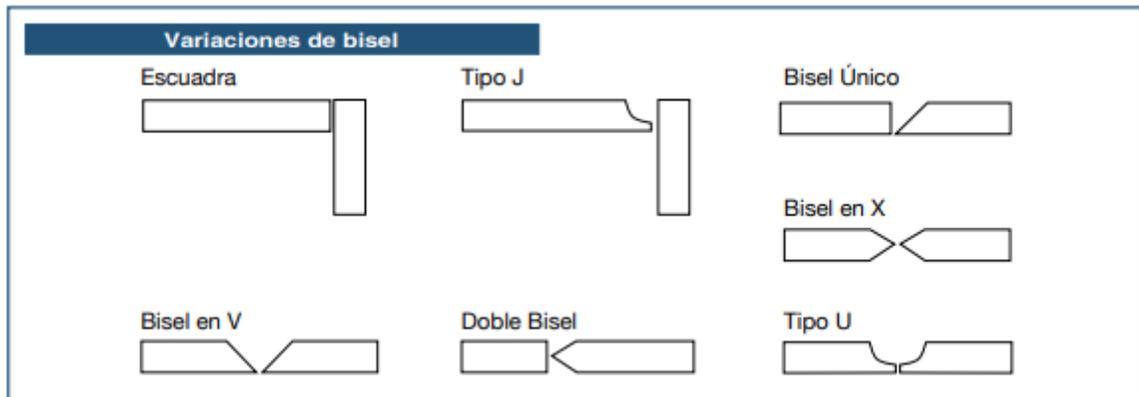


Figura No 4 Variaciones de bisel. Fuente: Manual de soldadura INDURA (2002).

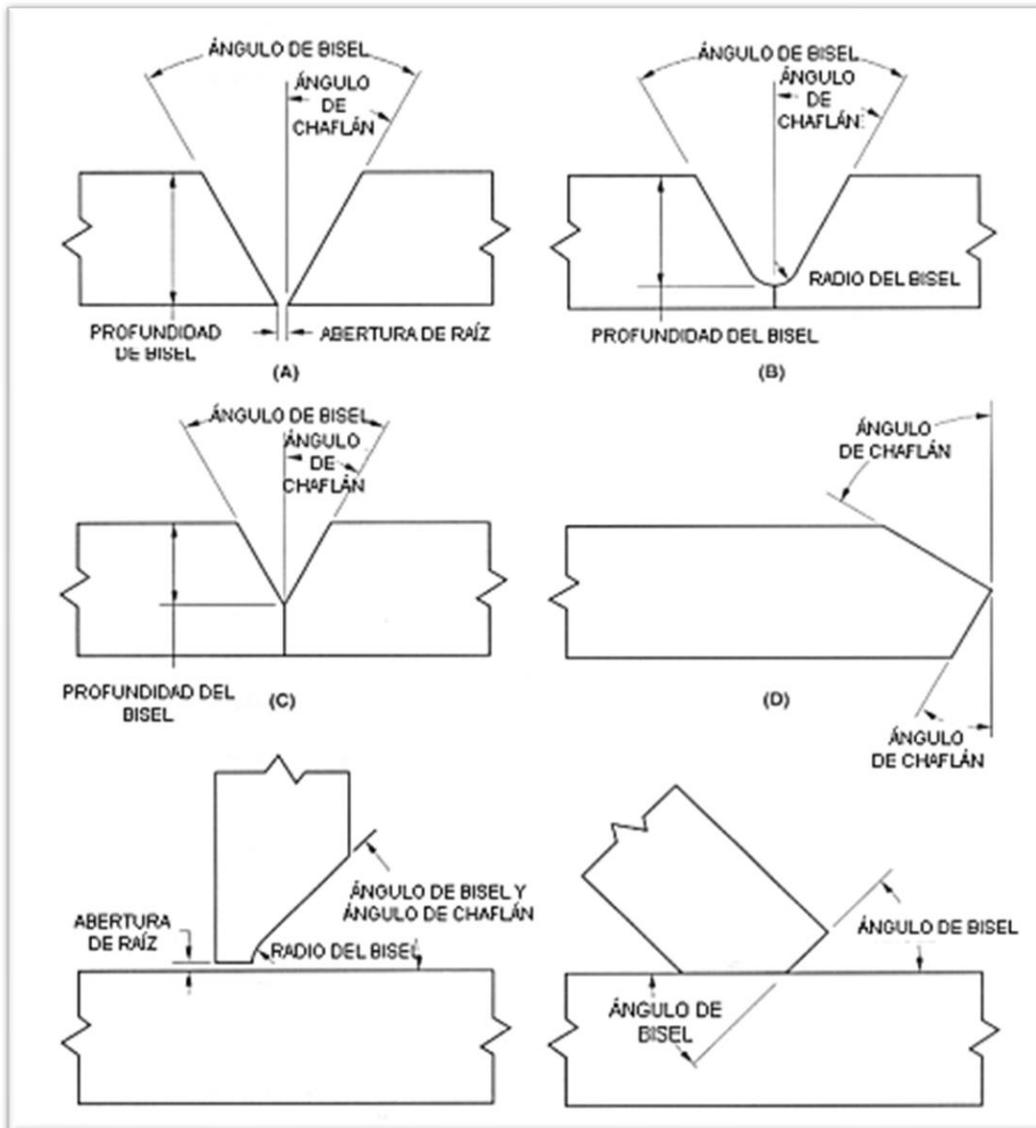


Figura No 5 Ángulos de bisel vs chaflán. Fuente: Módulo No.4 geometría de las juntas de soldadura y simbología de soldadura

2.2.14. Medidas para protección personal

Durante la soldadura deben tomarse en cuenta algunas medidas de protección personal como son las siguientes:

- Uso de calzado e indumentaria adecuados como delantales, polainas, guantes y botas.
- Proteger la cara y los ojos de la radiación del arco usando caretas y gafas para soldar.
- Asegurarse de trabajar en superficies secas y el aislamiento correcto igual que la revisión de las conexiones para evitar descargas eléctricas.

2.2.15. Equipo de soldadura SMAW

En la figura 6 se puede observar un equipo relativamente sencillo y práctico el cual se compone de una fuente de poder, porta electrodo, y cable de fuerza, la figura 7 muestra un equipo real que es asequible en el mercado.

2.2.16. Electrodo

Tal como se ha manifestado para realizar este proceso de soldadura al arco con electrodo recubierto, se disponen de diversos tipos de electrodos cada uno de ellos seleccionados de acuerdo con el material de que está constituido su núcleo, el tipo de recubrimiento y además por el diámetro del electrodo. La AWS. (American Welding Society) ha normalizado su diseño y utilización y para su identificación se utiliza un Código de Siglas tal como se aprecia en la figura 8, la cual aparece en la parte superior de cada electrodo, debe aclararse que la sigla de posiciones se refiere a la posición en la que se coloca el electrodo a la hora de estar ejecutando el cordón de soldadura.

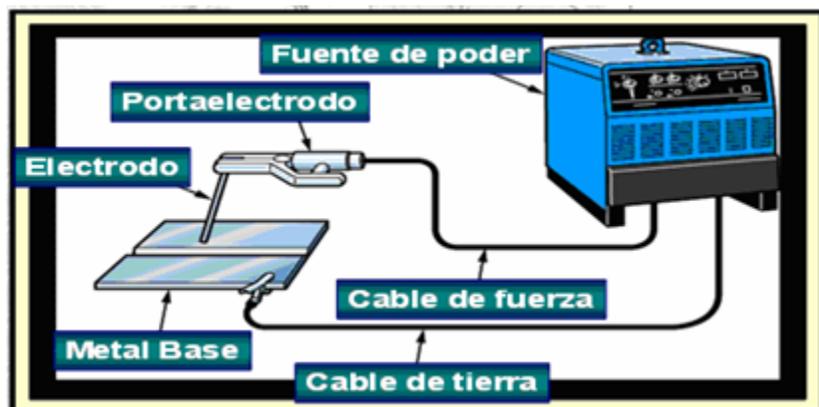


Figura No 6 Equipo básico de soldadura, Fuente: ITW WELDING PRODUCT GRUP



Figura No 7 Equipo de soldadura, Fuente: INFRA (2020)

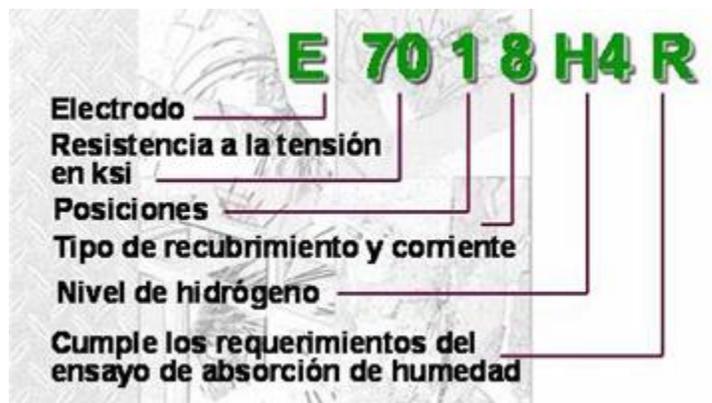


Figura No 8 Clasificación AWS A5.1 para electrodos. Fuente: ITW Welding Product Grup

Clasificación AWS	Valores Mínimos	
	Resistencia a la tensión (Psi)	Límite de cedencia (Psi)
E60XX	62.000	50.000
E70XX	70.000	57.000
E80XX	80.000	67.000
E90XX	90.000	77.000
E100XX	100.000	87.000
E110XXa	110.000	95.000
E120XXa	120.000	107.000
a. En este tipo de electrodos se utiliza recubrimiento tipo hidrógeno únicamente		

Tabla 3 Resistencia a la tensión según designación, Fuente: ITW WELDING PRODUCT GRUP

Clasificación	Posiciones
EXX1X	Plano, horizontal, vertical, sobrecabeza
EXX2X	Plano, horizontal (filete)
EXX4X	Plano horizontal, vertical, descendente, sobrecabeza

Tabla 4 . Posiciones de soldadura. Fuente: ITW WELDING PRODUCT GRUP

. Posiciones de soldadura. Fuente: ITW WELDING PRODUCT GRUP

2.2.17. Defectos de soldadura.

El proceso de soldadura trae algunas consecuencias al momento de aplicarla, estos son algunos de los defectos que más influyen según las características del material utilizado y sus causas

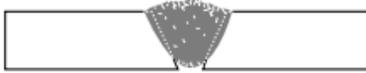
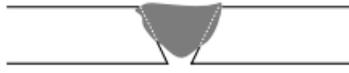
Defectos	Causas
<p><i>Mal aspecto</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Conexiones defectuosas. • Recalentamiento. • Electrodo inadecuado. • Longitud de arco y amperaje inadecuado.
<p><i>Penetración excesiva.</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Corriente muy elevada.</i> • <i>Posición inadecuada del electrodo.</i>
<p><i>Salpicadura excesiva.</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Corriente muy elevada.</i> • <i>Arco muy largo.</i> • <i>Soplo magnético excesivo.</i>
<p><i>Soldadura porosa.</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Arco corto.</i> • <i>Corriente inadecuada.</i> • <i>Electrodo defectuoso.</i>
<p><i>Penetración incompleta.</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Velocidad excesiva.</i> • <i>Electrodo de Ø excesivo.</i> • <i>Corriente muy baja.</i> • <i>Preparación deficiente.</i> • <i>5. Electrodo de Ø pequeño.</i>

Tabla 5 Defectos de soldadura. Fuente: Elaboración Propia

2.2.18. Dureza.

El termino de dureza se refiere al impedimento que presentan algunos los materiales cuando se desea alterar sus propiedades físicas y mecánicas, esto se refiere a la resistencia que posee cierto material al tener contacto con otro.

Hay muchos métodos para realizar ensayos de dureza, estos buscan evaluar las propiedades de un material, tales como su fuerza, ductilidad y resistencia al desgaste.

2.2.19. Desgarre.

Se considera desgarre a la fuerza de tensión máxima que recibe un material hasta llegar al punto de rotura, en esta se pueden aplicar ensayos a través de equipos de medición (máquina universal de ensayos) para medir la resistencia y el tiempo que tarda una probeta ante la abertura de una fisura o grieta y la ductilidad de un material. El ensayo de desgarre de un material se puede evaluar como prueba de control de calidad para uniones soldadas a tope.

3. METODOLOGÍA

Este proyecto se enmarca en una investigación de campo de carácter descriptivo correlacional, ya que se realizarán juntas soldadas dentro del laboratorio de la Universidad de acuerdo con los rangos determinados de operación para la aplicación específica de Postes de alumbrado de público como se encuentran en la ciudad de Montería. Posteriormente, se realizarán ensayos destructivos y no destructivos de estas juntas para describir el comportamiento de sus propiedades mecánicas y establecer la incidencia de las variables de soldadura en el acabado y así obtener un procedimiento específico de soldadura (WPS) para un producto concreto, en este caso postes de alumbrado público con tubería de acero ASTM-A53 de Ø3. Por tanto, este proyecto se desarrollará en 4 fases conformadas de la siguiente manera:

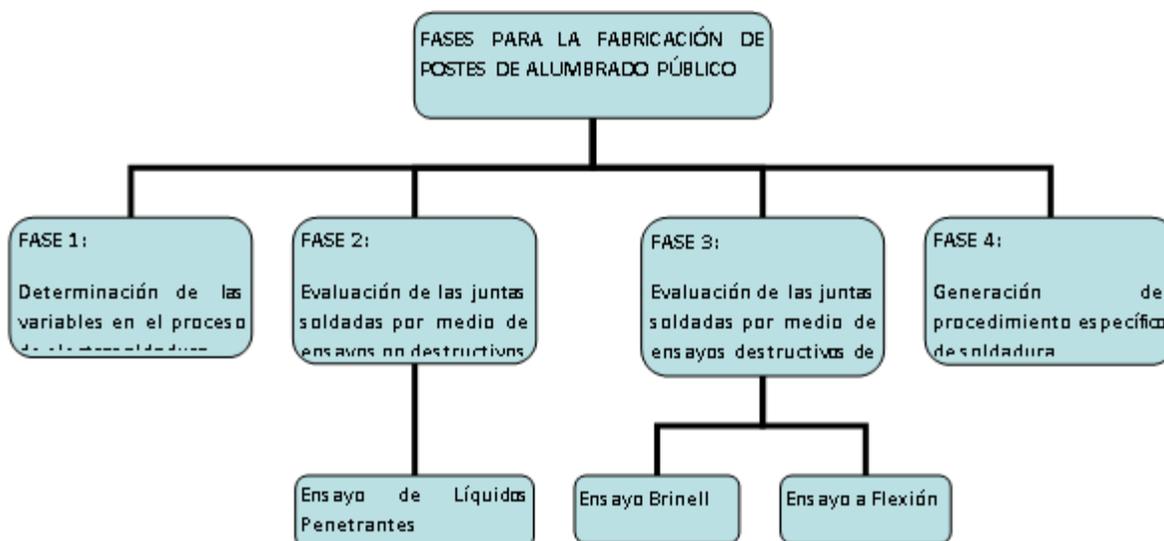


Figura No. 9 Fases para la fabricación de postes de alumbrado público. Fuente: elaboración propia

3.1. FASE 1: DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SOLDADURA PARA LA FABRICACIÓN DE POSTES PARA EL ALUMBRADO PÚBLICO.

Esta fase inicia con un diagnóstico general sobre las variables relacionadas con el proceso de soldadura que se utilizan en la fabricación de postes de alumbrado público como se encuentran en la ciudad de Montería. Para ello se realizará una revisión de la literatura actual, el estándar AWS D1.1, así como de publicaciones relacionadas con la temática con el fin de elegir desde la literatura, dentro de todas las variables que influyen el proceso de soldadura SMAW (corriente, amperaje, polaridad, velocidad de avance, longitud de arco, electrodo, material base, posición, ángulo de incidencia), las que más influyen o se vuelven relevantes en las propiedades mecánicas y/o calidad de las juntas soldadas.

Luego de seleccionar las variables relevantes o con mayor influencia dentro del proceso de soldadura SMAW, se realizará una serie de cinco juntas soldadas para el tubo Ø3". Los rangos que se utilizarán para la realización de la junta dependerán de la literatura encontrada.

Para la fabricación de las 5 probetas, se cuenta con los equipos del laboratorio de máquinas

y herramientas de la universidad. Ver tabla 5 donde se evidencia los equipos a utilizar y especificaciones técnicas.

EQUIPOS	DESCRIPCIÓN
 A red and black Lincoln Electric Tig/MMA-250 inverter welder is shown sitting on a wooden workbench. The machine is partially inside its cardboard shipping box, which is open. The welder has a black handle and a red body with the Lincoln Electric logo.	<p>Soldador Inversor de Trabajo Profesional de 250 Amperios a 110/220v Marca: LINCOLN ELECTRIC Modelo: TIG/MMA-250 Serie: EN60974-1:2012</p>
 A yellow and black DeWalt industrial angle grinder is shown from a three-quarter perspective. The tool has a black handle and a yellow body with the DeWalt logo. It is a 4 1/2 inch model.	<p>Pulidora Industrial 4 1/2" 1200w 11000RPM Marca: DEWALT Modelo: Dwe4212-b3</p>
 A yellow and black DeWalt industrial angle grinder is shown from a three-quarter perspective. The tool has a black handle and a yellow body with the DeWalt logo. It is a 9 inch model.	<p>Pulidora Industrial 9" 2400w 6500RPM Marca: DEWALT Modelo: Dwe4559-b3</p>

	<p>Esmeril de Banco 1/2 HP 6" 3450 RPM Marca: DEWALT Modelo: Dw752-b3</p>
---	--

Tabla 6 Equipos para utilizar. fuente: Elaboración propia

3.2. FASE 2: EVALUACIÓN DE LAS JUNTAS SOLDADAS POR MEDIO DE ENSAYOS DE LÍQUIDOS PENETRANTES PARA IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS SIGUIENDO LA NORMA ASTM-E165: 2018.

Para el inicio de esta fase se realizará una inspección visual de la junta soldada realizada, buscando defectos perceptibles como grietas, socavaciones, poros o cualquier otro tipo de discontinuidades en el cordón. Posteriormente, se realizará a cada una de las juntas el ensayo no destructivo por medio de líquidos penetrantes el cual ayuda a evaluar el estado del cordón de la soldadura superficialmente sin alterar de forma permanente sus propiedades mecánicas, físicas, dimensionales o químicas.

Este ensayo con líquidos penetrantes consiste en la aplicación de un líquido sobre las juntas soldadas para evaluar su calidad y su acabado. Este líquido penetra por capilaridad en las imperfecciones que han podido quedar en dichas juntas. Una vez haya pasado un tiempo después de la aplicación del penetrante, se aplica un eliminador para limpiar el exceso y, por último, un producto que revelará los defectos visuales e imperfecciones que han quedado del proceso de soldadura. En la figura 11 se muestra el procedimiento a seguir para este ensayo y que va de acuerdo con la norma ASTM-E 165: 2018.

En la figura No.11 se muestra el kit de líquidos que se utilizan en dicha inspección. El primer líquido es denominado limpiador, como su nombre lo indica, es el encargado de limpiar el área el cual se le realizará el ensayo. El segundo es la tinta penetrante, la cual es aplicada en la zona limpiada y es el encargado de encontrar los defectos que se puedan presentar en la aplicación de la soldadura. El tercero es el encargado de hacer visible dichos defectos y es llamado revelador

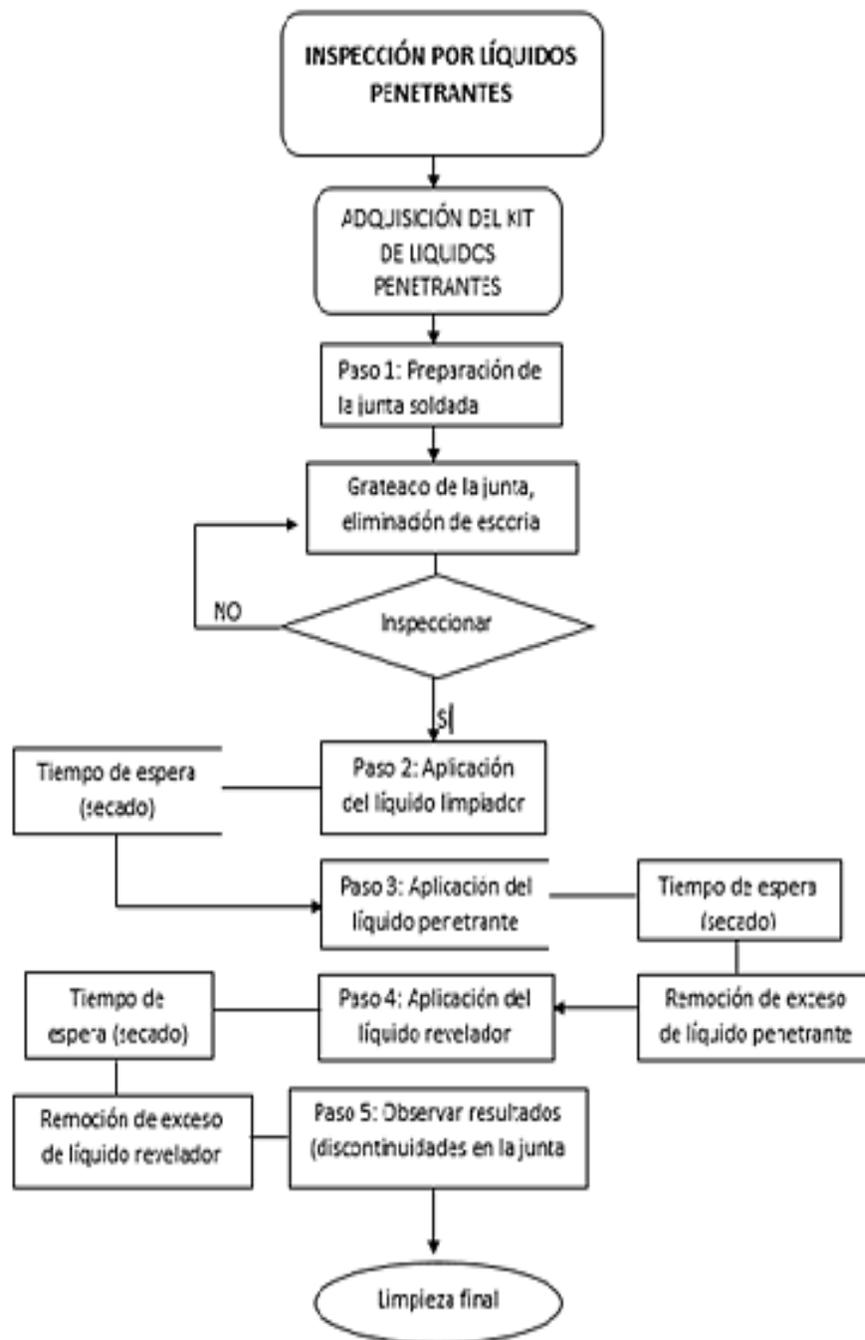


Figura No 10 Inspección por líquidos penetrantes. Fuente: Elaboración propia



Figura No 11 Líquidos penetrantes. Fuente: Trytech (2011)

3.3. FASE 3: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA SUPERFICIAL DE LA JUNTA SOLDADA POR MEDIO DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS (ED)

En esta fase se verificará la resistencia superficial de cada una de las muestras realizadas por medio de los ensayos destructivos para juntas soldadas. En este caso se iniciará con el ensayo de dureza Brinell bajo la norma ASTM-E10. Para esto se contará con un durómetro HSM 51 disponible en la universidad y los parámetros establecidos en la norma anteriormente mencionada. Posteriormente, también se realizará el ensayo de flexión.

3.3.1. Ensayo destructivo de dureza

Para aplicar la carga en el durómetro se debe garantizar que el cordón de soldadura esté plano, ya que esta es la forma de funcionamiento correcto del equipo. Por lo tanto, se deben realizar los siguientes preparativos:

1. Desbaste de soldadura sobrante en el cordón con el disco de pulir de $\text{Ø}4\text{-}1/2'' \times 1/4''$.
2. Grateo y limpieza del cordón.

EQUIPOS	DESCRIPCIÓN
	<p>Pulidora Industrial 4 1/2" 1200w 11000RPM Marca: DEWALT Modelo: Dwe4212-b3</p>
<p>HSM51 – Rockwell/Brinell Combined Systems</p> 	<p>Durómetro HSM51 Rockwell / Brinell Combined System Proveedor: ICL - Didáctica Ltda Marca: P.A. Hilton Ltda Modelo: HSM51/03172</p>

Tabla 7 Equipos para ensayo destructivo de dureza

En la tabla No.6. se enuncian los equipos a utilizar en esta etapa del proyecto. Este ensayo de dureza deberá ser aplicado en 3 puntos de la probeta, en el cordón de soldadura (punto C), en la zona afectada por el calor (haz) justo al lado del cordón (punto B) y en el extremo de la probeta en una zona no afectada por el calor (punto A). Ver figura No.12.

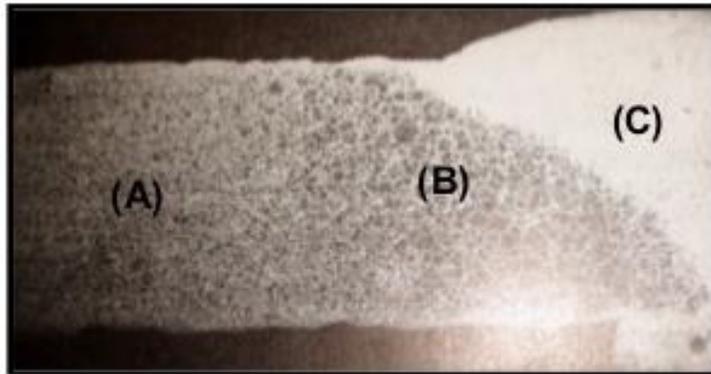


Figura No 12 Puntos de aplicación del ensayo de dureza Brinell. Fuente: Gonnella (2013)

Nota: A = Material base
B = Zona afectada por el calor
C = Deposito de soldadura

Posteriormente a los preparativos se da inicio al procedimiento del ensayo de dureza. Para esto es necesario inicialmente hacer la verificación de la nivelación del equipo, luego se debe colocar el equipo en descarga, es decir, ubicar la palanca de carga en la posición A. Seguidamente se deben ubicar el indentador de $\text{Ø}2.5$ mm de dureza Brinell, y el selector de carga en 187.5 kg/f. Después de esto, se debe limpiar la superficie de la probeta con un trapo, y así mismo, limpiar la superficie de la esa de ensayo del durómetro. Luego, se debe ubicar la probeta de soldadura en la mesa de ensayo del durómetro.

Seguido de esto, se debe subir la probeta con la manivela del tornillo, hasta que toque el indentador. Se deben dar dos vueltas y media más en la manivela del tornillo. Es necesario verificar que el dial se mueva las 2.5 vueltas. Adicionalmente verificar que la otra agua dentro del dial esté en la parte central de la franja marcada.

Paso seguido, se debe pasar la palanca de carga de descargado a cargado de forma lenta, es decir, de la posición A, a la posición B. luego se deben esperar unos segundos que la aguja del dial se estabilice, y posteriormente se ubica nuevamente la palanca de cargado a descargado, es decir, volver a la posición A.

Antes de seguir, se debe esperar que la aguja del dial se ubique en el valor de dureza, tomar el valor de dureza dado por el equipo y alejar la probeta del indentador. Luego de esto se debe verificar que la aguja del dial vuelva a su posición inicial.

Es importante que para los puntos C y B se repitan los pasos anteriores desde la limpieza de la superficie de la probeta y la mesa de ensay, ubicar el indicador en carga 0 y desmontar el indentador.

3.3.2. Ensayo destructivo de flexión o desgarre

Un ensayo de flexión sirve para evaluar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia a la flexión de un material. Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.

	<p>Máquina Universal Ensayos Marca: MTS Modelo: LPS.305 Serial: 547272 Capacidad: 300 kN Sensibilidad: 2.854 mV/V</p>
---	--

Tabla 8 Equipo para ensayo destructivo de flexión o desgarre. fuente: Elaboración propia

Para esta prueba inicialmente se deben ubicar los componentes de la máquina universal para ensayo de flexión. Tanto para parte superior como para la parte inferior, se debe abrir el programa de la máquina universal MTS, luego se abre la plantilla de ensayo de flexión; seguidamente, se deben tomar las dimensiones de la sección transversal de la probeta y la distancia entre apoyos. Estos datos deben ser registrados en la plantilla de flexión, posteriormente se debe ejecutar el ensayo y guardar los resultados obtenidos.

En este ensayo se mide el desgarre de las probetas bajo inspección visual, las herramientas utilizadas para la medición son, una cinta métrica y pie de rey según la norma resistencia al desgarre y de ensayo a flexión, norma ASTM-E8/8M.

El desgarre para este ensayo se mide de acuerdo con la longitud total de las grietas generadas por el ensayo a flexión, de tal manera, que la que tuvo mayor longitud de grietas tendrá una calificación de 1 y la que tuvo una longitud de grietas menor tendrá una calificación de 5.

3.4. FASE 4: GENERACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO DE SOLDADURA WPS, PARA LA FABRICACIÓN DE TUBOS DE ALUMBRADO PÚBLICO.

Luego de haberse obtenido todos los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos de las juntas soldadas, se procede a hacer una calificación de cada una de las probetas. Para el caso de la calificación de los ensayos no destructivos será una calificación cualitativa de acuerdo con la cantidad de defectos y así se tendrá una valoración (Ver tabla No.9).

Descripción	Detalle (Cant. Defectos)	Abreviatura	Valoración
Muy Defectuoso	9-10	MD	1
Defectuoso	7-8	D	2
Medianamente Defectuoso	4-6	MmD	3
Poco Defectuoso	1-3	PD	4
Sin defectos	0	SD	5

Tabla 9 Calificación de ensayos no destructivos (END). Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para el caso de la calificación de los ensayos destructivos será teniendo en cuenta el porcentaje de variación de las propiedades mecánicas con respecto al material inicial, (Ver tabla 10). Las principales propiedades mecánicas que se verificarán son: dureza, tenacidad, desgaste, fragilidad, flexión, elasticidad, plasticidad, resiliencia y fatiga; entre otras.

Variación	Calificación
Varía más del 30% con respecto al material inicial	1
Varía del 23 al 29% del material inicial	2
Varía del 15 al 22% del material inicial	3
Varía del 10 al 14% del material inicial	4
Varía menos del 10% con respecto al material inicial	5

Tabla 10 Calificación de ensayos destructivos (ED). Fuente: Elaboración propia

Luego que se realizó la calificación de cada probeta, se escoge la de mayor calificación y teniendo en cuenta los rangos de variables utilizados para la fabricación de esa probeta, se realiza el WPS donde nos indica de forma completa de cómo realizar una exitosa unión soldada.

Se establecerá entonces, el WPS específico en la fabricación de postes de alumbrado público de acuerdo con la muestra realizada, aquí se especificarán cada uno de los detalles del proceso de soldadura como variables esenciales, no esenciales y suplementarias para obtener la soldadura deseada que cumpla con los criterios de control de calidad. Estas especificaciones en el WPS son: diseño de junta, tipo de proceso, material base, material de aporte, posiciones de soldadura, precalentamiento, cantidad y temperatura entre pase, tratamiento de post calentamiento, características eléctricas, características técnicas, métodos de limpieza, ensayos destructivos y no destructivos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SOLDADURA PARA LA FABRICACIÓN DE POSTES PARA EL ALUMBRADO PÚBLICO

Primero es necesario identificar las características del poste de alumbrado público y según la información disponible, las láminas para su fabricación deben tener las siguientes condiciones:

Elemento	SAE 1010	SAE 1020
% Carbono	0.08 a 0.13	0.18 a 0.22
% Fosforo Máx.	0.05	0.05
% Azufre máx.	0.05	0.05
% Manganeso máx	0.3 a 0.6	0.3 a 0.6
% Silicio máx	0.05	0.05

Tabla 11 Requisitos de las láminas y platinas postes de alumbrado público Fuente: Manual Técnico CODENSA (2020)

Por otra parte, para tubería se trabajan todas las posiciones de soldadura: 1G – 2G – 3G – 4G – 6G, resultando la más complicada la posición 6G, pero esta al ser una soldadura que se aplica en el tubo galvanizado, este puede girar de tal manera que el soldador siempre se ubicará en posición en 1G, por tanto, esta se tomará para la fabricación de las probetas.

Los electrodos utilizados para la realización de los ensayos son suministrados en el taller mecánico de la Universidad Pontificia Bolivariana, estos son: AWS E-6011, AWS E-6013 y AWS E-7018, en diámetros variados de 3/32”, 1/8” y 5/32”.

Clasificación AWS: E6011				
Nombre WEST ARCO: ACP 611SS				
Diámetro mm (in)	2.4 mm (3/32)	3.2 mm (1/8)	4.0 mm (5/32)	4.8 mm (3/16)
Longitud	300 mm	350 mm	350 mm	350 mm
Amperaje	50 – 90 A	80 – 120 A	120 – 160A	1160 – 220 A
Posición soldar	TODAS	TODAS	TODAS	TODAS
Clasificación AWS: E6013				
Nombre WEST ARCO: SW 613				
Diámetro mm (in)	2.4 mm (3/32)	3.2 mm (1/8)	4.0 mm (5/32)	4.8 mm (3/16)
Longitud	300 mm	350 mm	350 mm	350 mm
Amperaje	40 – 90 A	70 – 120 A	129 – 190 A	160 – 240 A
Posición soldar	TODAS	TODAS	TODAS	TODAS
Clasificación AWS: E7018				
Nombre WEST ARCO: WIZ 18 S				
Diámetro mm (in)	2.4 mm (3/32)	3.2 mm (1/8)	4.0 mm (5/32)	4.8 mm (3/16)
Longitud	300 mm	350 mm	350 mm	350 mm
Amperaje	60– 110 A	100 – 160 A	130– 210 A	190 – 280 A

Posición soldar	TODAS	TODAS	TODAS	TODAS
-----------------	-------	-------	-------	-------

Tabla 12 Parámetros de soldeo. Fuente: Manual de Soldadura INDURA (2002)

Para la realización de un WPS se identifican bajo concepto propio las variables más esenciales del proceso de soldadura, con esto se busca estandarizarlas y así poder obtener óptimos resultados en la aplicación de esta.

VARIABLE	ESENCIAL	NO ESENCIAL
Proceso	X	
Materiales	X	
Diámetro	X	
Espesor de aplique	X	
Diseño de junta	X	
Metal de aporte	X	
Fundente y numero de capas		X
Características eléctricas	X	
Características de llama		X
Posición	X	
Progresión de soldeo	X	
Tiempo entre pases		X
Tipo y remoción de alineadores		X
Limpieza	X	
Pre calentamiento y tratamiento térmico post soldadura (pwht)		X
Gas de protección y rata de flujo		X
Fundente		X
Velocidad de avance	X	
Método de enfriamiento post soldadura		X

Tabla 13 Cuadro de variables esenciales y no esenciales estándar. Fuente: Elaboración propia

Cuadro de variables esenciales y no esenciales estándar. Fuente: Elaboración propia

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UPB a partir de lo cual y teniendo en cuenta las características de la soldadura WPS para tuberías de postes metálicos de alumbrado público ASTM-A53, se determinan las siguientes variables a través de ensayos en 5 probetas, teniéndose en cuenta la norma para soldar acero galvanizado en caliente y el diámetro requerido para dicha función que en este caso es de 3 pulgadas:

Probeta 1

Corriente	Polaridad	Amperaje	Electrodo	Diámetro Electrodo	Velocidad de avance	Longitud de arco	Posición
CA	Normal	90 A	6011	3/32"	2.16 pulg/min	2,381 mm	P (plana)

Tabla 14 Variables probeta No.1

Probeta 2:

Corriente	Polaridad	Amperaje	Electrodo	Diámetro Electrodo	Velocidad de avance	Longitud de arco	Posición
CA	Normal	105A	6013	3/32"	2.38 pulg/min	2,381 mm	P (plana)

Tabla 15 Variables probeta No.2

Probeta 3:

Corriente	Polaridad	Amperaje	Electrodo	Diámetro Electrodo	Velocidad de avance	Longitud de arco	Posición
CD	Normal	120 A	7018	3/32"	2.44 pulg/min	2,381 mm	P (plana)

Tabla 16 Variables probeta No. 3

Probeta 4:

Corriente	Polaridad	Amperaje	Electrodo	Diámetro Electrodo	Velocidad de avance	Longitud de arco	Posición
CD	Normal	115 A	6011	3/32"	2.94 pulg/min	2,381 mm	P (plana)

Tabla 17 Variables probeta No.4

Probeta 5:

Corriente	Polaridad	Amperaje	Electrodo	Diámetro Electrodo	Velocidad de avance	Longitud de arco	Posición
CD	Normal	105 A	6013	3/32"	2.46 pulg/min	2,381 mm	P (plana)

Tabla 18 Variables probeta No.5

Se debe tener en cuenta que la longitud total de las probetas es de 30 cm cada sección tiene 15cm, como lo muestra en la figura no.13. A cada probeta se le hace limpieza y posteriormente un bisel a 45°, esto con el fin de aplicar el trazado del cordón de soldadura entre las dos piezas de metal como lo muestra en la figura no.14.



Figura No 13 Limpieza y unión de bisel antes de aplicar soldadura



Figura No 14 Trazado de cordón de soldadura, posición plana

4.2. EVALUACIÓN DEL ESTADO SUPERFICIAL DE LA JUNTA SOLDADA POR MEDIO DE LÍQUIDOS PENETRANTES PARA IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS SIGUIENDO LA NORMA ASTM-E165: 2018.

Se realizó el grado de limpieza de las probetas bajo la norma SSPC-SP3 (Limpieza con herramientas manuales mecánicas) grateo con disco de pulir (esmerilado). Se aplican las tintas penetrantes a las probetas en el área ya soldada con el limpiador, después se aplica la tinta roja que es la tinta penetrante, la cual es aplicada en la zona limpiada y es dejada por un tiempo de 10 minutos. Posteriormente, se procede a pasar el limpiador nueva y finalmente se aplica el revelador dejándolo actuar por 10 minutos. Al cabo de este tiempo se procede a realizar la inspección visual de las juntas soldadas. El proceso se puede ver en las ilustraciones siguientes:



Figura No 15 Tintas Penetrantes



Figura No 16 Probetas soldadas listas para ensayos ED y END



Figura No 17 Aplicación de líquido limpiador



Figura No 18 Aplicación de líquido penetrante

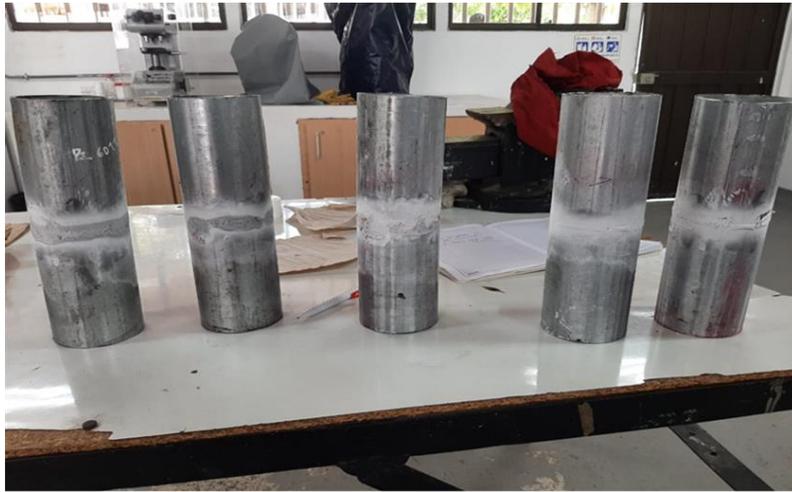


Figura No 19 Aplicación de líquido revelador

Ahora se procede a realizar el proceso de inspección visual para cada una de las probetas, de tal manera que se identifiquen cuáles defectos y la cantidad de defectos en la junta soldada y así proceder a su evaluación y calificación.

Probeta No. 1



Figura No 20 Probeta 1 soldada y limpia, lista para ensayo



Figura No 21 Probeta 1 evaluada por inspección visual

Inspección visual inicial:

Al evaluar el estado superficial de la junta soldada de la probeta, se evidencia:

- Salpicadura
- Dificultad en la limpieza de la escoria.

Inspección visual después de END PT:

Después de la aplicación del ensayo por líquidos penetrantes se evidenciaban 2 puntos rojos que se asocian a la porosidad en la zona soldada por falta de material de aporte.

Tabla 19 Inspección por END Probeta 1. Fuente: Elaboración propia

Descripción	Detalle (Cant. Defectos)	Abreviatura	Valoración
Muy Defectuoso	8+	MD	1
Defectuoso	6-7	D	2
Medianamente Defectuoso	4-5	MmD	3
Poco Defectuoso	2-3	PD	4
Sin defectos	0-1	SD	5

Tabla 20 Calificación END Probeta 1. Elaboración Propia

Probeta No. 2



Figura No 22 Probeta 2 soldada y limpia, lista para ensayo



Figura No 23 Probeta 2 evaluada por inspección visual

Inspección visual inicial:

Al evaluar el estado superficial de la unión soldada de la probeta se considera:

- Facilidad al limpiar escoria después de soldar
- No evidencia ningún tipo de defecto.

Inspección visual después de END PT:

Por ensayo de líquidos penetrantes, se observan 4 puntos rojos asociados a porosidad que son específicamente por falta de penetración del material de aporte al material base.

Tabla 21 Inspección por END probeta 2. Fuente: Elaboración propia

Descripción	Detalle (Cant. Defectos)	Abreviatura	Valoración
Muy Defectuoso	9-10	MD	1
Defectuoso	7-8	D	2
Medianamente Defectuoso	4-6	MmD	3
Poco Defectuoso	1-3	PD	4
Sin defectos	0	SD	5

Tabla 22 Calificación de ensayos no destructivos (END) Probeta No.2. Fuente: Elaboración Propia

Probeta No. 3



Figura No 24 Probeta 3 soldada y limpia, lista para ensayo



Figura No 25 Probeta 3 evaluada por inspección visual

Inspección visual inicial:

Se evalúa el estado superficial del cordón de soldadura:

- Muestra dificultad al realizar la limpieza de la escoria.

Inspección visual después de END PT:

En el ensayo de líquidos penetrantes se observan 6 puntos rojos asociados a la porosidad que puede ser ocasionada por el relleno incompleto de material de aporte entre el empalme de un cordón y otro.

Tabla 23 Inspección por END probeta 3. Fuente: Elaboración propia

Descripción	Detalle (Cant. Defectos)	Abreviatura	Valoración
Muy Defectuoso	9-10	MD	1
Defectuoso	7-8	D	2
Medianamente Defectuoso	4-6	MmD	3
Poco Defectuoso	1-3	PD	4
Sin defectos	0	SD	5

Tabla 24 Calificación de ensayos no destructivos (END) Probeta No. 3. Fuente: Elaboración Propia

Probeta No. 4



Figura No 26 Probeta 4 soldada y limpia, lista para ensayo



Figura No 27 Probeta 4 evaluada por inspección visual

Inspección visual inicial:

Al evaluar el estado superficial de la probeta se observa:

- Poca salpicadura
- Fácil de limpiar escoria.

Inspección visual después de END PT:

Se evidencia un pequeño punto rojo asociado a la porosidad que podría ser por falta de limpieza del material antes de realizar el ensayo o por falta de material de aporte entre el empalme de un cordón y otro.

Tabla 25 Inspección por END probeta 4. Fuente: Elaboración propia

Descripción	Detalle (Cant. Defectos)	Abreviatura	Valoración
Muy Defectuoso	9-10	MD	1
Defectuoso	7-8	D	2
Medianamente Defectuoso	4-6	MmD	3
Poco Defectuoso	1-3	PD	4
Sin defectos	0	SD	5

Tabla 26 Calificación de ensayos no destructivos. Probeta No. 4. Fuente: Diseño propio con base en ensayos de laboratorio

Probeta No. 5



Figura No 28 Probeta 5 soldada y limpia, lista para ensayo



Figura No 29 Probeta 5 evaluada por inspección visual

Inspección visual inicial:

- Fácil de limpiar escoria.
- No salpicaduras

Inspección visual después de END PT:

En el ensayo de líquidos penetrantes no se evidencian puntos rojos lo que se considera que no hay ningún tipo de defecto.

Tabla 27 Inspección por END probeta. Fuente: Elaboración propia

Descripción	Detalle (Cant. Defectos)	Abreviatura	Valoración
Muy Defectuoso	9-10	MD	1
Defectuoso	7-8	D	2
Medianamente Defectuoso	4-6	MmD	3
Poco Defectuoso	1-3	PD	4
Sin defectos	0	SD	5

Tabla 28 Calificación de ensayos no destructivos (END). Probeta No. 5. Fuente: Diseño propio con base en ensayos de laboratorio

De acuerdo con la ejecución y la inspección del estado superficial de las probetas y del ensayo por líquidos penetrantes se puede afirmar que la probeta No. 5, obtuvo la mejor calificación dando como resultados una probeta limpia y sin defectos.

4.3. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA SUPERFICIAL DE LA JUNTA SOLDADA POR MEDIO DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS (ED)

4.3.1. Prueba de dureza (Ensayo Brinell)

Para el ensayo de dureza se tuvieron que hacer 5 probetas nuevas, ya que las probetas anteriores con sus dimensiones no ingresaban en el equipo. Estas nuevas probetas tuvieron una forma rectangular de 2" x 1" y fueron realizadas con el mismo material del tubo de Ø3" y con las mismas variables en las mismas condiciones de las probetas anteriores.

La calificación de los ensayos destructivos será teniendo en cuenta el porcentaje de variación de las propiedades mecánicas con respecto al material inicial.

Toma de muestras en zonas específicas con respecto al material inicial:

Se inicia principalmente con una probeta o placa de acero galvanizado totalmente limpia. A partir de allí se toma la dureza en 5 puntos en zonas específicas tales como, (centro, derecha -debajo, derecha arriba, izquierda arriba, izquierda debajo) como se muestra en la figura No.30.

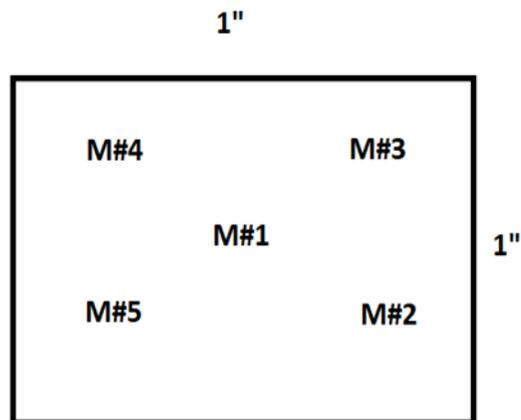


Figura No 30 Toma de muestras material inicial. Fuente: Elaboración propia

HBR= Medición de dureza en escala Brinell

M= Muestra

Muestra No. 1	48HBR, centro
Muestra No.2	42.5 HBR, derecha- debajo
Muestra No.3	45 HBR, derecha-arriba
Muestra No.4	48HBR, izquierda-arriba
Muestra No.5	48HBR, izquierda-debajo

Tabla 29 Muestras probeta inicial. Fuente: Elaboración Propia

El resultado de las muestras tomadas a la probeta inicial es un promedio de 46.3 HBR.

Para realizar el ensayo de dureza de las 5 probetas se tienen en cuenta tres puntos en las tres zonas del material como se evidencia en la figura No.31, se debe tener en cuenta que es el mismo tubo de Ø3", soldadas y con las distintas variables ya estipuladas. Ver resultados de ensayo de dureza en tabla 29.

- M1: Dureza en el punto de soldadura
- M2: Dureza en la zona afectada por el calor
- M3: Dureza en el punto alejado

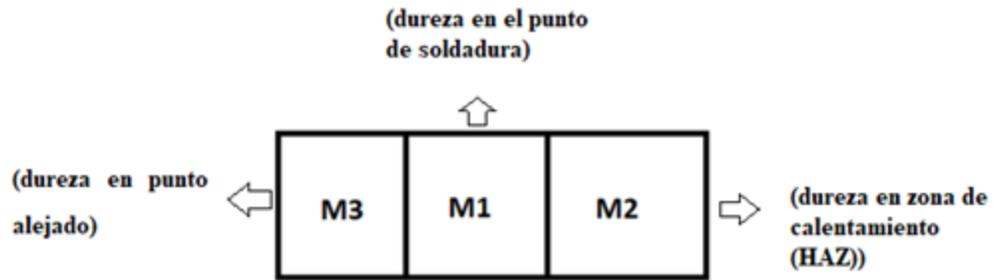


Figura No. 31. Zonas de medición de muestras. Fuente: Elaboración propia.

Medición Probeta No 1	Medición Probeta No.2
	
<p>M1= 51.5HBR M2= 50HBR M3= 53HBR</p>	<p>M1 = 99.25 HBR M2= 81 HBR M3= 85HBR</p>
Medición Probeta No 3	Medición Probeta No.4
	

M1= 51 HBR M2= 56 HBR M3=55 HBR	M1=86.6 HBR M2= 91HBR M3= 81,25 HBR
Medición Probeta No 5	
	
M1=48.6 HBR M2= 50 HBR M3= 56 HBR	

Tabla 30 Datos obtenidos por ensayo Brinell. Fuente: elaboración propia

Al obtener los datos resultantes de cada muestra por parte de la máquina de ensayos Brinell, se procede a hacer una calificación cuantitativa de las cinco probetas evaluadas en promedio con la probeta inicial, de allí, se obtuvo el porcentaje de variación y su respectiva calificación como lo muestra en las siguientes tablas:

La probeta No. 1, tiene una calificación de 11.23% lo cual le confiere una valoración de 4.

Variación	Valoración
Varía más del 30% con respecto al material inicial	1
Varía del 23 al 29% del material inicial	2
Varía del 16 al 22% del material inicial	3
Varía del 10 al 15% del material inicial	4
Varía menos del 10% con respecto al material inicial	5

Tabla 31 Calificación de ensayos destructivos (ED). Probeta No.1. Fuente: Elaboración propia

Al tener una variación de más del 30%, la Probeta 2 obtiene una calificación de 90.96% y una valoración de 1.

Variación	Valoración
Varía más del 30% con respecto al material inicial	1
Varía del 23 al 29% del material inicial	2
Varía del 16 al 22% del material inicial	3
Varía del 10 al 15% del material inicial	4
Varía menos del 10% con respecto al material inicial	5

Tabla 32 Calificación de ensayos destructivos (ED), Probeta No.2. Fuente: Elaboración propia

Al variar más del 16% y menos del 22% tiene una calificación de 16.63% la Probeta 3, obtiene una calificación de 16.63% por tanto tiene una valoración de 3.

Variación	Valoración
Varía más del 30% con respecto al material inicial	1
Varía del 23 al 29% del material inicial	2
Varía del 16 al 22% del material inicial	3
Varía del 10 al 15% del material inicial	4
Varía menos del 10% con respecto al material inicial	5

Tabla 33 Calificación de ensayos destructivos (ED), probeta No.3. Fuente: Elaboración Propia

Al variar más del 30% la Probeta 4, obtiene una calificación de 86.36% por tanto tiene una valoración de 1.

Variación	Valoración
Varía más del 30% con respecto al material inicial	1
Varía del 23 al 29% del material inicial	2
Varía del 16 al 22% del material inicial	3
Varía del 10 al 15% del material inicial	4
Varía menos del 10% con respecto al material inicial	5

Tabla 34 Calificación de ensayos destructivos (ED), probeta No.4. Fuente: Elaboración Propia

La probeta No. 5 tiene una calificación de 11.30% lo cual le confiere una valoración de 4.

Variación	Valoración
Varía más del 30% con respecto al material inicial	1
Varía del 23 al 29% del material inicial	2
Varía del 16 al 22% del material inicial	3
Varía del 10 al 15% del material inicial	4
Varía menos del 10% con respecto al material inicial	5

Tabla 35 Calificación de ensayos destructivos (ED), probeta No.5. Fuente: Elaboración Propia

De tal forma en cuanto a los resultados de dureza con la máquina de ensayos Brinell pueden resumirse para las probetas así:

Probeta	46,3		HBR		en punto		Promedio de Variación	Calificación
	Dureza en soldadura	Dureza en HAZ	Dureza alejado	Dureza en punto	Valor (HBR)	% Variación		
1	51,5	11,23%	50	7,99%	53	14,47%	11,23%	4
2	99,25	114,36%	81	74,95%	85	83,59%	90,96%	1
3	51	10,15%	56	20,95%	55	18,79%	16,63%	3
4	86,6	87,04%	91	96,54%	81,25	75,49%	86,36%	1
5	48,6	4,97%	50	7,99%	56	20,95%	11,30%	4

Tabla 36 Resumen Resultados obtenidos Ensayo Brinell en probetas evaluadas. Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Ensayo de Flexión o doblez.

Se inicia el ensayo de doblez por medio de la máquina universal la cual está totalmente sincronizada para recaudar las mediciones correspondientes y así obtener los resultados. Los datos recaudados por la máquina son considerados con las siguientes mediciones:

- Cruceta: mm
- Carga: Kn
- Tiempo: Seg

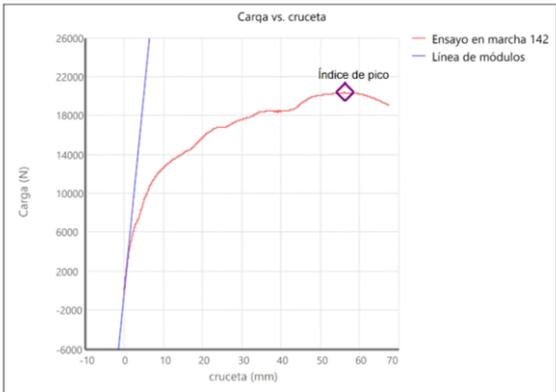
Probeta 1		
Resultados de Ensayo		
Carga Máxima	Desplazamiento Cruceta	Tiempo Total
19,028 KN	67,605 mm	136,023 seg
		
		
Evidencia Desgarre		
<ul style="list-style-type: none"> • Grieta 1: 2.4 cm • Grieta 2: 0.2 cm <p>Total, longitud Grietas: 2.6 cm (26 mm)</p>		

Tabla 37 Datos obtenidos probeta No.1 ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia

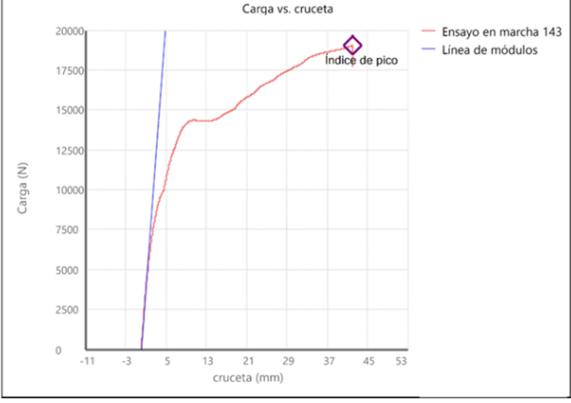
Probeta 2		
Resultados de Ensayo		
Carga Máxima	Desplazamiento Cruceta	Tiempo Total
17,714 KN	42,165 mm	177,936 seg
		
Evidencia Desgarre		
<ul style="list-style-type: none"> • Grieta 1: 1.4 cm • Grieta 2: 0.4 cm • Grieta 3: 0.2 cm • Grieta 4: 0.1 		
<p>Total, longitud Grietas: 2.1 cm (21 mm)</p>		

Tabla 38 Datos obtenidos probeta No.2 ensayo de flexion. Fuente: Elaboracion Propia

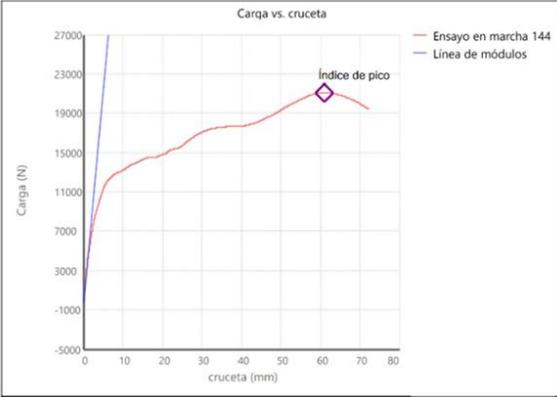
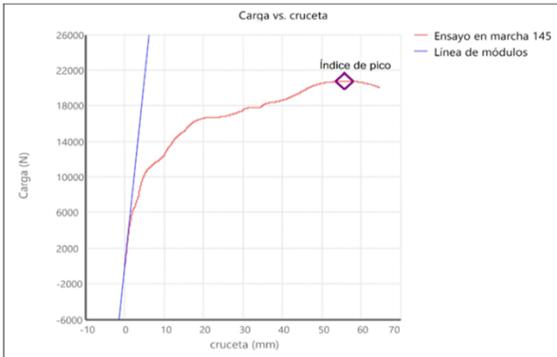
Probeta 3		
Resultados de Ensayo		
Carga Máxima	Desplazamiento Cruceta	Tiempo Total
19,40 KN	72,312 mm	145,438 seg
		
Evidencia Desgarre		
<ul style="list-style-type: none"> • Grieta 1: 1.6cm • Grieta 2: 0.6 cm • Grieta 3: 0.1 cm • Grieta 4: 0.2cm • Grieta 5: 0.4 cm • Grieta 6: 1.4 cm <p>Total, longitud Grietas: 4.3 cm (43 mm)</p>		

Tabla 39 Datos obtenidos probeta No.3 ensayo a flexión. Fuente: Elaboración Propia

Probeta 4		
Resultados de Ensayo		
Carga Máxima	Desplazamiento Cruceta	Tiempo Total
20,02 KN	64,80 mm	130,421 seg
		
Evidencia Desgarre		

- Grieta 1: 2.4 cm
- Grieta 2: 1.6 cm
- Grieta 3: 0.2 cm

Total, Longitud Grietas: 3.2 cm (32 mm)

Tabla 40 Datos obtenidos probeta No.4 ensayo a flexión. Fuente: Elaboración Propia

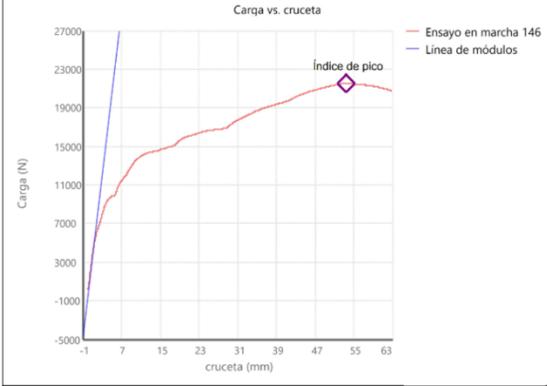
Probeta 5		
Resultados de Ensayo		
Carga Máxima	Desplazamiento Cruceta	Tiempo Total
20,77 KN	62,80 mm	126,419 seg
		
Evidencia Desgarre		
<ul style="list-style-type: none"> • Grieta 1: 2.4 cm • Grieta 2: 0.4 cm • Grieta 3: 0.2 cm • Grieta 4: 1.2 cm 		
Total, Longitud Grietas: 4.2 cm (42 mm)		

Tabla 41 Datos obtenidos probeta No.5 ensayo a flexión. Fuente: Elaboración Propia

	Longitud de Grietas	Calificación
Probeta 1	26 mm	4
Probeta 2	21 mm	5
Probeta 3	43 mm	1
Probeta 4	32 mm	3
Probeta 5	42 mm	2

Tabla 42 Calificación de ensayo de flexión. Fuente: Elaboración Propia

Resumen Calificación Ensayos				
	Líquidos Penetrantes	Dureza	Flexión	Promedio
Probeta 1	4	4	4	4
Probeta 2	3	1	5	2.3
Probeta 3	3	3	1	2.3
Probeta 4	4	1	3	2.6
Probeta 5	5	4	2	3.6

Tabla 43 Resumen de calificación de ensayos. Fuente: Elaboración Propia

Con los resultados obtenidos en los ensayos destructivos y no destructivos la probeta No.1 obtuvo una calificación de 4, lo cual se convierte en la probeta con mejores propiedades para realizar el procedimiento específico de soldadura para postes de alumbrado público con tubería de Ø 3”.

4.4. GENERACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO DE SOLDADURA WPS, PARA LA FABRICACIÓN DE TUBOS DE ALUMBRADO PÚBLICO TENIENDO EN CUENTA RANGOS DE OPERACIÓN DE VARIABLES DE LAS PROBETAS Y SU CARACTERIZACIÓN

Para la realización de este ítem se consideran los resultados óptimos obtenidos en los ensayos de laboratorio y que muestran a la Probeta No.1 como la mejor calificada, de tal manera que en la tabla 44 se especifican las variables utilizadas para la generación de esta probeta y que serán referenciadas para el procedimiento específico de soldadura.

Corriente	Polaridad	Amperaje	Electrodo	Diámetro Electrodo	Velocidad de avance	Longitud de arco	Posición
CA	No aplica	90 A	6011	3/32”	2.16 pulg/min	2,381 mm	P (plana)

Tabla 44 Descripción Variables Soldadura Probeta 1

Para la elaboración del WPS, el equipo utilizado fue un soldador Inversor de trabajo Profesional de 250 Amperios a 110/220V marca: LINCOLN ELECTRIC, modelo: TIG/MMA-250, serie: EN60974-1:2012. Se utilizó un electrodo E-6011 que posee un revestimiento de tipo celulósico con arco estable y moderada cantidad de salpicaduras, resistencia a la tracción de 430 Mpa a 495Mpa y un límite de fluencia de 330Mpa a 424Mpa. La energía que genera el arco asegura una excelente penetración hacia el material base y es apta para soldar en todas las posiciones (plana, vertical, horizontal, sobrecabeza), puede utilizarse corriente alterna, corriente continua y es aplicada principalmente para soldar tuberías con o sin costuras, todas estas características se encuentran en la tabla No.45. De acuerdo con las juntas soldadas realizadas se evidencia que el amperaje influye significativamente en propiedades del cordón de soldadura, en este caso superiores a 110A genera más afectaciones en la junta soldada. Y qué segunda instancia se evidencia que la corriente también es una variable significativa, ya que la corriente alterna (sin dirección) y amperajes medios (90A – 100A) generaban cordones mejores.

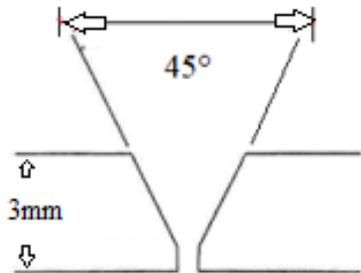
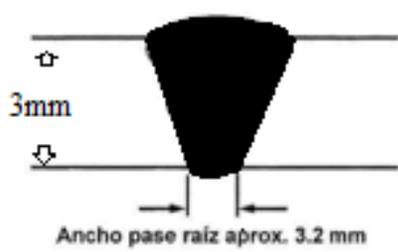
PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO DE SOLDADURA (WPS) PARA POSTES DE ALUMBRADO PÚBLICO		
Fecha: octubre de 2021	Aplicación: soldadura a tope acero galvanizado postes de alumbrado público	WPS: postes A. P
Material base: Tubería galvanizada Ø 3"	Rango de espesores de pared: 3 mm a 3.2 mm	Posición: Plana
Registro de calificación: N/A	Proceso de soldadura: SMAW (shield metal arc welding)	
Códigos regulatorios: AWS.D1.1	Material de aporte: Electrodo 6011 Ø 3/32"	Pre calentamiento: N/A
Tiempo entre pases: El más corto posible	Técnica de soldadura: Único cordón por toda la periferia del tubo. Se debe realizar paradas cuando se requiera cambio del electrodo.	Alivio térmico: Ninguno
Limpieza entre pases: Único cordón. Solo se requiere limpieza al iniciar y al finalizar la soldadura con cepillo de alambre o como sea requerido para eliminar incrustaciones.	Velocidad de avance: 2 pulg / min – 2.3 pulg / min. Se recomienda: 2.16 pulg/min	Amperaje: 90A
	Longitud de arco: Rango de 2.381 mm	Polaridad: N/A
	Corriente: Alterna	
Notas:		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Mantener la misma velocidad de avance para evitar discontinuidades en el cordón. 2. Realizar inspección visual después de cada cordón. 3. Aplicar ensayo no destructivo por líquidos penetrantes al cordón de presentación. 		
 <p>Diagrama que muestra un cordón de soldadura con un ángulo de 45° y un espesor de 3 mm.</p>		 <p>Diagrama que muestra un cordón de soldadura con un ancho de pase raíz aproximado de 3.2 mm.</p>
Firma ingeniero:	Fecha de aprobación:	

Tabla 45 Procedimiento específico de soldadura (WPS) para postes de alumbrado público. Fuente: Elaboración Propia

5. CONCLUSIONES

La investigación es realizada con el fin de diseñar un procedimiento específico de soldadura SMAW para juntas de postes de alumbrado público en tubería de acero ASTM-A53, galvanizada en caliente, esta siguió los parámetros técnicos a partir de los ensayos realizados en los laboratorios de la UPB seccional Montería, que permiten detallar las variables más importantes involucradas en el proceso de la junta soldada de los postes metálicos de alumbrado público, tales como: corriente, polaridad, amperaje, tipo de electrodo, diámetro de electrodo, velocidad de avance, longitud de arco y posición, de tal manera que se mejore la eficiencia y se disminuya los daños mecánicos y reduciendo los reclamos de garantías de los clientes de la empresa REMEC S.A.S.

Con la evaluación del estado superficial de la junta soldada por medio de líquidos penetrantes para identificación de defectos siguiendo la norma ASTM-E165: 2018, se puede decir que es un método rápido y eficaz para detectar los defectos encontrados en las juntas soldadas; para que este método sea un éxito debe ser proporcional a la limpieza de las piezas que se van a soldar; es necesario aclarar, que este ensayo detecta solamente defectos superficiales y se puede decir que es un buen criterio que pueden tener los ingenieros para aceptar o rechazar una junta soldada. Este ensayo se puede realizar en cualquier parte, ya que los líquidos son portátiles.

Con relación a la evaluación del comportamiento y resistencia superficial de la junta soldada por medio de ensayos destructivos (ED) de dureza y estabilidad de acuerdo con ensayo Brinell con la norma ASTM-E10 y ensayo a flexión de acuerdo con norma ASTM-E8/8M, estos evalúan la probeta de manera profunda comparando y evaluando su comportamiento en relación con sus propiedades mecánicas, dando así un criterio de aceptación o rechazo al inspector o al ingeniero a cargo. En este ensayo se requiere más tiempo y máquinas especializadas, de tal manera que siempre deberá realizarse en laboratorios donde se puede evaluar la capacidad y resistencia de la junta soldada y puede compararse con lo requerido en el diseño o análisis de carga de la estructura. Por su parte el ensayo de doblez, las probetas son evaluadas bajo inspección visual, usando como herramientas de medición, pie de rey y cinta métrica la cual son utilizadas para medir la dimensión de las grietas obtenidas en el ensayo.

En este trabajo de grado un WPS se vuelve un documento necesario para la estandarización de procesos de soldadura, es por eso por lo que, a través de los resultados obtenidos en todos los ensayos realizados, la probeta con mejor evaluación fue la probeta No.1, la cual tiene las siguientes características: amperaje: 90A, polaridad: N/A, corriente: Alterna, electrodo: E-6011, velocidad de avance: 2.16 pulg/min, longitud de arco: 2.381mm. Se recomienda a la empresa REMEC SAS, tenga en cuenta lo descrito en el WPS para así mejorar las condiciones de trabajo y la calidad de su producto, así logrará aumentar significativamente la rentabilidad del producto aprovechando la ventaja competitiva con la que cuenta la empresa y la confianza entre los clientes.

BIBLIOGRAFÍA

Aracil, M. (2018). Soldadura y corte de los aceros inoxidable. (2 Ed). Madrid: Asociación para la Investigación y Desarrollo del Acero.

Batista, W. (2015). Efecto térmico de la soldadura por arco sumergido en un acero bajo aleado. (Tesis de grado). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa (Cuba).

Bluematic. (2016). Bluematic Catalgo-General 2016. [En línea]. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/336772315/Bluematic-Catalgo-General-2016>

Bolaños, C., Rivas, J. y Coronado, J. (2019). Caracterización de las propiedades mecánicas y microestructurales de soldaduras empleadas en la recuperación de ejes. Revista Facultad de Ingeniería (36); 33-43.

Buenaño, L., Castillo, E., Cuaical, B. y Padilla, C. (2019). Ensayos no destructivos y rehabilitación de elevadores de vehículos ferroviarios. Revista electrónica Ciencia Digital, 3, (1); 333-350.

Consejo Profesional Nacional de Ingeniería. (2003). Ley 842 de 2003. [En línea]. Recuperado de <https://copnia.gov.co/nuestra-entidad/normatividad/ley-842-de-2003>

ENEL-CODENSA. (2020). ET204 Postes metálicos para alumbrado público. [En línea]. Recuperado de https://likinormas.micodensa.com/Especificacion/postes/et204_postes_metalicos_alumbrado_publico_documento_preliminar

Gonnella, M. (2019). Soldadura. [En línea]. Recuperado de <https://es.slideshare.net/MaraGonnella/soldadura-2013-1>

Ibertest. (2020). Máquina de ensayos universal hidráulica. [En línea]. Recuperado de <https://www.ibertest.es/products/maquina-universal-ensayos-hidraulica-serie-ibmt4/>

INDURA. (2002). Manual de sistemas y materiales de soldadura. INDURA.

Jeffus, L. (2019). Soldadura: principios y aplicaciones (3Ed.). Editorial Paraninfo.

Julcapari, M. (2013). Planeación en procedimiento de soldadura para mejorar uniones soldadas en aceros ASTM A36 en la empresa Mota-Engil Perú. (Tesis de grado). Universidad Nacional del centro del Perú. Huancayo (Perú).

Ministerio de Minas y Energía. (2017). Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. RETILAP. [En línea]. Recuperado de https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/23886159/220617_py_actRETILAP_balastos_dri_vers_140617.pdf/60f7f53b-c591-4c4a-b682-688f9383601e

Monsalvas J. y Chacha, P. (2015). Diseño y construcción de un equipo de soldadura por arco sumergido para el laboratorio de la universidad politécnica salesiana. (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana. Quito (Ecuador).

Morato, R. (2018). Análisis de los procesos de soldadura aplicados en cuatro empresas de la ciudad de Bogotá dedicadas a la fabricación de los cuerpos de los carrotanques en acero al carbono para transporte de crudo. (Tesis de grado). Universidad Libre. Bogotá (Cundinamarca, Colombia).

Niebles, E. y Arnedo, W. (2009). Procedimientos de soldadura y calificación de soldadores: una propuesta de enseñanza y guía de aplicación para la industria. *Información Tecnológica*, 20, (3); 19-30.

Sánchez, E. (2005). Uso y aprovechamiento de electrodos en soldadura manual. (Tesis de grado). Universidad Austral de Chile. Valdivia (Chile).

Santos, E., Yenque, D., Rojas, O., y Rosales, U., (2018). Acerca del ensayo de dureza. *Notas Científicas. INDUSTRIAL DATA*, 2 (4); 73-80.

Sociedad Americana de Soldadura. (2000). ANSI/AWS D1.1. 2000. Código para Soldadura Estructural -Acero. [En línea]. Recuperado de <https://www.soldaceros.com.pe/wp-content/uploads/2015/09/ANSI-AWS-D1.1.-2000.pdf>

Tamayo y Tamayo (2002). *El proceso de la investigación científica*. (4ta. Ed.). Editorial Limusa.

Trytech. (2011). Lanzamiento al Mercado del Kit de Tintas Penetrantes Trytech. [En línea]. Recuperado de <https://www.trytech.com.ar/blogprivado/?p=9>

Walteros, O. (2012). Estado del arte de los procesos de soldadura involucrados en el montaje de tubería API 5L para transporte de hidrocarburos. (Tesis de grado). Universidad Libre de Colombia. Bogotá (Cundinamarca, Colombia).

