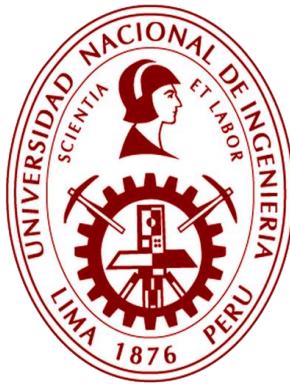


# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



### TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Propuesta del Proceso de Soldadura por Arco Sumergido para la  
Mejora de la Fabricación de Aros de Camiones Mineros 797F**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por

Ronald León Najarro

[0009-0005-8655-7284](tel:0009-0005-8655-7284)

Asesor

Ing. Paredes Jaramillo Santiago Víctor

[0009-0003-8418-0714](tel:0009-0003-8418-0714)

LIMA – PERÚ

2025

---

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Citar/How to cite              | (León, 2025)  |
| Referencia/Reference           | León, R. (2025). <i>Propuesta del Proceso de Soldadura por Arco Sumergido para la Mejora de la Fabricación de Aros de Camiones Mineros 797F</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style:<br>APA (7ma ed.) |   |

---

## **Lista de contenidos**

|   |      |
|---|------|
| Lista de tablas.....  | vii  |
| Lista de figuras .....  | ix   |
| Resumen .....   | xii  |
| Abstract .....  | xiii |
| Introducción .....  | xiv  |
| CAPITULO I Generalidades .....                                  | 1    |
| 1.1. Antecedentes de la investigación.....                      | 1    |
| 1.2. Identificación y descripción del problema de estudio ..... | 4    |
| 1.3. Formulación del problema .....                             | 5    |
| 1.3.1. Problema principal .....                                 | 5    |
| 1.3.2. Problemas secundarios .....                              | 5    |
| 1.4. Justificación e importancia.....                           | 5    |
| 1.5. Objetivos .....  | 6    |
| 1.5.1. Objetivo general.....                                    | 6    |
| 1.5.2. Objetivos específicos.....                               | 6    |
| 1.6. Hipótesis.....   | 6    |
| 1.6.1. Hipótesis general .....                                  | 6    |
| 1.6.2. Hipótesis específicas .....                              | 7    |
| 1.7. Variables y operacionalización de variables.....           | 7    |
| 1.7.1. Variables .....  | 7    |
| 1.7.2. Operacionalización de variables.....                     | 7    |
| 1.8. Metodología de la investigación.....                       | 8    |
| 1.8.1. Unidad de análisis .....                                 | 8    |
| 1.8.2. Tipo, enfoque y nivel investigación.....                 | 8    |
| 1.8.3. Diseño de investigación.....                             | 9    |
| 1.8.4. Fuente de información .....                              | 9    |

|  |    |
|--|----|
| 1.8.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....                   | 9  |
| 1.8.6. Análisis y procesamiento de datos .....                                 | 10 |
| CAPITULO II Marco teórico y marco conceptual.....                              | 11 |
| 2.1. Marco teórico.....  | 11 |
| 2.1.1. Soldadura .....   | 11 |
| 2.1.2. Procesos de soldadura.....  | 12 |
| 2.1.2.1. Proceso de soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW).....      | 12 |
| 2.1.2.2. Proceso de soldadura por arco metálico con gas (GMAW) .....           | 19 |
| 2.1.2.3. Proceso de soldadura por arco eléctrico con núcleo fundente (FCAW) .. | 24 |
| 2.1.2.4. Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) .....                   | 28 |
| 2.1.3. Mecanización y automatización en soldadura.....                         | 46 |
| 2.1.3.1. Proceso manual .....  | 47 |
| 2.1.3.2. Proceso semiautomático .....  | 47 |
| 2.1.3.3. Proceso mecanizado .....  | 47 |
| 2.1.3.4. Proceso automático .....  | 48 |
| 2.1.3.5. Proceso robotizado .....  | 48 |
| 2.1.3.6. Soldadura por control adaptativo .....                                | 48 |
| 2.1.4. Normas, códigos, especificaciones y clasificaciones de soldadura .....  | 49 |
| 2.1.5. ASME Sección IX- Calificación de procedimientos de soldadura .....      | 52 |
| 2.1.5.1. Parte QW soldadura .....  | 53 |
| 2.1.5.2. Parte QB soldadura fuerte .....                                       | 55 |
| 2.1.6. Vehículos .....   | 56 |
| 2.1.6.1. Vehículos sobre carretera (on the road).....                          | 56 |
| 2.1.6.2. Vehículos fuera de carretera (off the road - OTR).....                | 57 |
| 2.1.7. Aros.....   | 58 |
| 2.1.7.1. Clasificación según medida de diámetro .....                          | 58 |
| 2.1.7.2. Clasificación según instalación y acoplamiento al vehículo .....      | 60 |
| 2.1.8. Aros para vehículos fuera de carretera .....                            | 61 |
| 2.1.8.1. Partes de aros de vehículo fuera de carretera .....                   | 62 |
| 2.1.8.2. Otros elementos de los aros .....                                     | 63 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.1.8.3. Medidas de instalación de los aros.....   | 64  |
| 2.1.9. Aros de múltiples piezas.....   | 65  |
| 2.1.10. Especificación del aro.....  | 68  |
| 2.1.11. Aros del camión CAT 797F .....   | 70  |
| 2.1.12. Costos de soldadura.....   | 79  |
| 2.2. Marco Conceptual.....   | 84  |
| CAPITULO III Desarrollo del trabajo de investigación .....   | 87  |
| 3.1. Determinación de las variables esenciales de soldadura .....  | 87  |
| 3.1.1. Metal base (QW-403) .....   | 87  |
| 3.1.2. Material de aporte (QW-404).....  | 88  |
| 3.1.3. Temperatura de precalentamiento (QW-406) y tratamiento térmico posterior a<br>(TTPS) soldadura (QW-407) .....   | 89  |
| 3.1.4. Gas (QW-408), características eléctricas (QW-409) y técnicas de soldadura (QW-<br>410) .....  | 89  |
| 3.2. Calificación el procedimiento de soldadura por arco sumergido y al operador del<br>proceso según la norma internacional ASME sección IX. ....               | 90  |
| 3.2.1. Preparación para la especificación de procedimiento de soldadura (WPS) .....  | 90  |
| 3.2.2. Elaboración del registro de calificación de procedimiento de soldadura (PQR) ...  | 93  |
| 3.2.3. Registro de calificación de operadores y soldadores (WQR).....  | 93  |
| 3.3. Comparación del costo beneficio de la implementación del proceso SAW con<br>respecto al proceso SMAW en la fabricación de aros de camiones mineros 797F. 94 |     |
| CAPITULO IV Resultados, contrastación de hipótesis y discusión de resultados .....   | 96  |
| 4.1. Comparación técnica del SAW frente a otros procesos de soldadura .....  | 96  |
| 4.2. Aplicación del proceso SAW en la fabricación de aros OTR de 5 piezas para<br>camiones Caterpillar modelo 797F .....   | 97  |
| 4.3. Equipos necesarios para la aplicación del proceso SAW.....  | 101 |
| 4.4. Registro de calificación del procedimiento de soldadura (PQR).....  | 104 |
| 4.5. Costo beneficio de implementación del proceso de soldadura.....   | 105 |
| 4.6. Contrastación de hipótesis.....   | 107 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| I. CONCLUSIONES .....     | 110 |
| II. RECOMENDACIONES ..... | 112 |
| III. REFERENCIAS .....    | 113 |
| ANEXOS.....               | 116 |

## Lista de tablas

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Tabla 1.  | Variables e indicadores de la investigación .....   | 7   |
| Tabla 2.  | Especificaciones según la AWS para electrodos recubiertos .....                                       | 15  |
| Tabla 3.  | Especificaciones según la AWS para electrodos para el proceso GMAW.....                               | 22  |
| Tabla 4.  | Alambres para SAW – diámetros e intervalo de corriente .....  | 34  |
| Tabla 5.  | Propiedades mecánicas mínimas con consumibles de acero al carbono cubiertos fuente: AWS A5.17 .....   | 36  |
| Tabla 6.  | Grado de participación del soldador en la realización de las operaciones de soldadura.....            | 49  |
| Tabla 7.  | Diferencias entre conceptos de normas, códigos, especificaciones y clasificaciones de soldadura ..... | 52  |
| Tabla 8.  | Clasificación de vehículos sobre carretera.....   | 56  |
| Tabla 9.  | Clasificación de vehículos fuera carretera .....  | 57  |
| Tabla 10. | Tamaño de aros de vehículos de carretera.....   | 59  |
| Tabla 11. | Tamaño de aros de vehículos fuera carretera.....  | 60  |
| Tabla 12. | Especificaciones de medida de aro y neumático .....   | 69  |
| Tabla 13. | Composición química del acero HSLA.....   | 71  |
| Tabla 14. | Eficiencia deposición de proceso de soldadura (%) .....   | 81  |
| Tabla 15. | Factor de operación de soldadura (%) .....  | 82  |
| Tabla 16. | Flujo de gas .....  | 83  |
| Tabla 17. | Factor del uso del fundente .....   | 83  |
| Tabla 18. | QW/QB-422 Números P .....   | 88  |
| Tabla 19. | Rango de números F: QW-432 .....  | 89  |
| Tabla 20. | Propiedades del acero A36.....  | 91  |
| Tabla 21. | Datos de soldadura para los procesos SAW y SMAW .....   | 95  |
| Tabla 22. | Resultados de área transversal, peso del metal depositado y velocidad de deposición .....             | 95  |
| Tabla 23. | Eficiencia de aportación.....   | 97  |
| Tabla 24. | Resultados de la prueba de tensión.....   | 105 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 25. Resultados de los ensayos de dobles.....                 | 105 |
| Tabla 26. Comparativa de costos entre los procesos SAW y SMAW..... | 106 |
| Tabla 27. Costos totales por proceso SAW y SMAW .....              | 106 |

## Lista de figuras

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 1.  | Proceso de soldadura de arco con electrodo revestido - SMAW.....  | 13 |
| Figura 2.  | Elementos de un circuito de soldadura típico para SMAW .....  | 14 |
| Figura 3.  | <i>Clasificación de electrodos según la AWS para el procesos SMAW – Aceros al carbono.....</i>                                | 16 |
| Figura 4.  | <i>Clasificación de electrodos según la AWS para el procesos SMAW – Aceros de baja aleación .....</i>                         | 17 |
| Figura 5.  | Proceso de soldadura por arco metálico con gas - GMAW .....   | 19 |
| Figura 6.  | Diagrama del equipo de soldadura por arco metálico con gas - GMAW.....  | 20 |
| Figura 7.  | Clasificación de electrodo de acero al carbono para GMAW .....  | 22 |
| Figura 8.  | Soldadura por arco con núcleo de fundente y autoprotección.....   | 24 |
| Figura 9.  | Soldadura por arco con núcleo de fundente protegida con gas .....   | 25 |
| Figura 10. | Equipo típico para soldadura por arco con núcleo de fundente semiautomática .....   | 25 |
| Figura 11. | Sistema de identificación para electrodos de acero dulce para FCAW.....   | 27 |
| Figura 12. | Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido .....   | 29 |
| Figura 13. | Sistema de clasificación para combinaciones fundente electrodo fuente: AWS A5.17 .....  | 37 |
| Figura 14. | Impacto de la inclinación de la pieza en la configuración del cordón de soldadura.....  | 41 |
| Figura 15. | Impacto de la posición del electrodo en relación con el surco de soldadura. 43  | 43 |
| Figura 16. | Influencia de la posición del electrodo en la forma de la franja de soldadura durante el desplazamiento circunferencial. .... | 44 |
| Figura 17. | Comparación de tamaños de Caterpillar 797F.....   | 58 |
| Figura 18. | Aro 22.5 x 8.25 Artillero .....   | 61 |
| Figura 19. | Aro con disco o plato .....   | 61 |
| Figura 20. | Aro de vehículo fuera de carretera de 63x44" de diámetro .....  | 62 |
| Figura 21. | Partes de un aro de vehículo fuera de carretera de 63" de diámetro .....  | 63 |
| Figura 22. | Elementos de bloqueo de un aro de un vehículo fuera de carretera .....  | 64 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 23. Medida de instalación de los aros – elementos de bloqueo .....  | 65 |
| Figura 24. Aro de 1 pieza de 16x6.....   | 66 |
| Figura 25. Aro de 2 piezas.....  | 66 |
| Figura 26. Aro de 3 piezas.....  | 67 |
| Figura 27. Aro de 4 piezas.....  | 67 |
| Figura 28. Aro de: (a) 5; (b) 6 y (c) 7 piezas .....   | 68 |
| Figura 29. Especificaciones del aro .....  | 69 |
| Figura 30. Esquema del aro del CAT 797F .....  | 70 |
| Figura 31. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de los aros 63x44 del CAT 797F .....   | 71 |
| Figura 32. Continuación del diagrama de flujo del proceso de fabricación de los aros 63x44 del CAT 797F .....  | 72 |
| Figura 33. (a) corte y (b) biselado de planchas de acero para la fabricación del aro del camión 797F.....  | 73 |
| Figura 34. Rolado de planchas de acero para la fabricación del aro del camión 797F ...   | 74 |
| Figura 35. Apuntalado de secciones.....  | 75 |
| Figura 36. Soldadura circunferencial y longitudinal mediante arco sumergido .....  | 76 |
| Figura 37. Inspección de aros .....  | 77 |
| Figura 38. Mecanizado con CNC.....   | 78 |
| Figura 39. Proceso de limpieza con banda abrasiva y pintado .....  | 78 |
| Figura 40. Aros ensamblados de 05 piezas terminados.....   | 79 |
| Figura 41. Diseño de junta doble bisel a tope sin respaldo para la fabricación de aros por SAW .....   | 91 |
| Figura 42. Combinación F7A4-EM12K, marca ESAB .....  | 93 |
| Figura 43. Aro base CAT 979 terminado .....  | 98 |
| Figura 44. Vista de corte lateral del aro de 05 piezas .....   | 98 |
| Figura 45. Base del aro (a) y secciones: (b) delantera – SD; (c) trasera – ST; (d) extensión de sección delantera – BCD; (e) Extensión de sección trasera – BCT; y (f) Disco central – DC..... | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 46. Proceso SAW en juntas del aro (a) interiores ST, BCT y DC; (b) interior SD con BCD; (c) interior BCD y DC; y (d) exterior ST, BCT, DC, BCD y SD..... | 100 |
| Figura 47. Fuente de energía Idealarc® DC-600 .....   | 101 |
| Figura 48. Alimentador Lincoln K356-2-NA-5.....   | 102 |
| Figura 49. Manipulador Lincoln CB-MATIC LM.....   | 103 |
| Figura 50. Posicionador Lincoln Posimatic PS30.....   | 104 |

## Resumen

En el sector minero hay gran diversidad de maquinaria tanto para exploración como para extracción. Esta maquinaria es dependiente de repuestos de alto rendimiento como los aros metálicos, los cuales son cruciales para adaptarse a neumáticos y deben poseer una resistencia excepcional al desgaste debido a las duras condiciones mineras. Sus deficiencias pueden resultar en fallos estructurales, reducción de la vida útil y un incremento de costos de mantenimiento. El objetivo del presente trabajo fue realizar una propuesta del uso del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW – *Submerged Arc Welding*) para la mejora de la fabricación de aros de camiones mineros 797F. Se determinaron las variables esenciales del procedimiento de soldadura, incluyendo el material base y aporte, parámetros eléctricos, uso de fundente y técnicas operativas, con base en los lineamientos de la norma ASME Sección IX. El procedimiento de soldadura y los operadores fueron calificados mediante la elaboración de registros detallados. Los resultados demostraron que el proceso SAW incrementa significativamente la eficiencia y productividad, logrando uniones soldadas de alta resistencia y con una reducción notable en defectos como porosidad y falta de fusión. Además, el análisis costo-beneficio evidenció que el proceso SAW genera un ahorro del 80% frente al proceso manual convencional, debido a su mayor velocidad de deposición, menor consumo de mano de obra y mayor eficiencia energética. Este ahorro se traduce en costos reducidos tanto en operación como en materiales. En conclusión, la implementación del proceso SAW mejora la durabilidad y rentabilidad de los aros metálicos, cumpliendo con los estándares internacionales y reduciendo costos operativos, ello lo convierte en una solución óptima para la industria minera.

**Palabras clave:** Soldadura; Aro; Camión Minero; CAT 797F; SAW; SMAW.

## Abstract

In the mining sector, there is a great diversity of machinery for both exploration and extraction. This machinery depends on high-performance spare parts such as metal rims, which are crucial for adapting to tires and must have exceptional resistance to wear due to the harsh mining conditions. Their deficiencies can result in structural failures, reduced useful life, and increased maintenance costs. The aim of this work was to propose the use of the submerged arc welding (SAW) process to improve the manufacturing of 797F mining truck rims. The essential variables of the welding procedure were determined, including the base and filler material, electrical parameters, flux use, and operating techniques, based on the guidelines of the ASME Section IX standard. The welding procedure and operators were qualified by preparing detailed records. The results showed that the SAW process significantly increases efficiency and productivity, achieving strong and reliable welded joints with a notable reduction in defects such as porosity and lack of fusion. In addition, the cost-benefit analysis showed that the SAW process generates savings of 80% compared to the conventional manual process, due to its higher deposition speed, lower labor consumption, and greater energy efficiency. These savings translate into reduced costs in both operation and materials. In conclusion, the implementation of the SAW process improves the durability and profitability of metal rims, complying with international standards and reducing operating costs, making it an optimal solution for the mining industry.

**Keywords:** Welding; Rim; Mining Truck; CAT 797F; SAW; SMAW.

## Introducción

La minería peruana destaca por su diversidad de minerales, y la explotación de estos recursos requiere maquinaria pesada y especializada. Estos equipos necesitan repuestos de alto rendimiento para operar en condiciones extremas. Los aros metálicos, componentes clave de los neumáticos de estos equipos, deben soportar grandes cargas y resistir el desgaste. La utilización de métodos de soldadura tradicionales, utilizados en la fabricación de aros puede generar fallas estructurales y reducir su vida útil, aumentando los costos de mantenimiento en las operaciones mineras. Por lo tanto, la demanda de aros con alta resistencia y durabilidad es constante en el sector minero peruano. En relación con ello, el objetivo de este trabajo fue proponer un proceso de soldadura por arco sumergido para la mejora de la fabricación de aros de camiones mineros 797F. Con esto, se procura brindar una guía de optimización del proceso de soldadura de aros OTR de 5 piezas para camiones. El presente trabajo está dividido en cuatro capítulos.

En el capítulo I se representan las generalidades de trabajo relacionados con los antecedentes, planteamiento del problema, justificación y objetivos. Asimismo, se muestran las variables, hipótesis y el enfoque metodológico.

El capítulo II compone el marco teórico y conceptual donde se describe las bases teóricas que fundamentan el trabajo de suficiencia profesional.

En el capítulo III trata sobre el desarrollo del trabajo que consta de la determinación de variables esenciales de soldadura, calificación del proceso por arco sumergido y comparación del costo-beneficio.

El capítulo IV muestra los resultados y discusión de los mismos, así como la contrastación de hipótesis sobre la propuesta de aplicación del proceso de soldadura por arco sumergido en la fabricación de aros OTR de 5 piezas para camiones Caterpillar modelo 797F. También, se mencionan los equipos básicos y necesarios para la aplicación del proceso de soldadura y los costos por metro lineal.

## CAPITULO I

### Generalidades

#### 1.1. Antecedentes de la investigación

Rios (2021) realizó un estudio económico de distintos procesos de soldadura para la fabricación de tanques de acero SA612 Gr. 90 de 13 mm de espesor empleados para almacenar 5200 galones gas licuado de petróleo. Utilizó planchas de acero SA612 roladas, las cuales fueron sometidas previamente a un tratamiento térmico de normalizado y/o de alivio de tensiones. La composición química de las planchas fue de acero de medio carbono. Hizo uso de dos procedimientos para la fabricación del tanque de 6 m de largo y 2 m de diámetro. El primer proceso consistió en la soldadura SAW (*Submerged Arc Welding*), llevada a cabo en posición plana con la rotación del tanque mediante el uso de viradores. La calificación del proceso se realizó mediante la unión de dos planchas en posición 1G. Se empleó como material de aporte el fundente y alambre LINCOLNWELD® LA-84, con un diámetro de 3,2 mm, tanto para el pase de raíz como para los pases de relleno y acabado. El segundo proceso involucró soldadura SAW y FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), para lo cual se necesitó un soldador para llevar a cabo el procedimiento alrededor del cilindro. La calificación se realizó mediante la unión de dos tuberías en posición 6G, así como en posición 1G para la soldadura SAW. Los materiales consumibles utilizados fueron INNERSHIELD® NR® -311-MP, con un diámetro de 24 mm para el pase de raíz, y LINCOLNWELD® LA-84, con un diámetro de 4 mm, para el pase de relleno. El autor concluye que la fabricación de tanques mediante el proceso de soldadura SAW resulta en un mayor ahorro económico en comparación con el proceso FCAW (Rios Cedán, 2021).

Machacca (2018) realizó un sistema de control de inspección de uniones soldadas de tanques de acero empleados en el almacenamiento de agua industrial para minería.

Las uniones fueron selladas por medio el proceso de soldadura por arco eléctrico o FCAW. La calificación del procedimiento de soldadura fue según el protocolo de la norma API 650 y, la calificación del soldador con la norma ASME sección IX, además, para el aseguramiento de las uniones soldadas hicieron inspecciones tanto visuales como radiográficas, y usaron líquidos penetrantes (Machacca Huacarpuma, 2018).

Zea (2016) en su investigación comparó de forma económica y técnica la fabricación de recipientes cilíndricos de acero al carbono para el transporte de concentrado de cobre, por medio de los procesos FCAW y SAW. Los procesos de soldadura se analizaron principalmente en 11 juntas circunferenciales, a razón de su longitud y el tiempo de soldeo. Las dimensiones de los cilindros fueron las siguientes: un diámetro interno de 2,38 metros y una altura de 2,25 metros. Estos cilindros estaban fabricados con material base de Acero ASTM A588, con un espesor de 4,5 milímetros. Para el empleo del proceso FCAW fue usado una fuente de poder de la marca Miller XMT 425 CC/CV, alimentador de alambre Suitcase Xtreme 12VS, antorcha Profax M400; y para proceso SAW una fuente de poder modelo LAF 1001, cabezal de soldeo modelo A2S Mini Master, controlador de proceso A2-A6 PEK, viradores convencionales modelo CD-5 CI-5 y manipulador ESAB CaB 600M. El autor ha demostrado que la aplicación del proceso SAW en la soldadura de las juntas circunferenciales resulta considerablemente más eficiente tanto técnica como económicamente, en comparación con el proceso FCAW. Particularmente en relación con el tiempo de soldadura en la fabricación de contenedores destinados al transporte de concentrado de cobre. Además, la implementación del equipo SAW y los accesorios necesarios para lograr un proceso mecanizado en la fabricación de estos recipientes ha demostrado generar un ahorro del 44,82% en comparación con la implementación del proceso FCAW (Zea Pilco, 2016).

En la investigación de Sante DiCecco (2014) se aborda la caracterización mecánica y material de aros de minería de cinco piezas, específicamente fabricadas con acero de alta resistencia Q345, un componente crítico en la industria minera. La investigación surge ante los incidentes frecuentes y peligrosos de fallos en los aros multipiezas utilizados en

vehículos mineros, donde factores como la fatiga del material y la corrosión aceleran el deterioro y comprometen la seguridad. Este estudio se centra en evaluar propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, dureza y resistencia a la fatiga del acero Q345, tanto en su estado original como pre-corroído, replicando condiciones de servicio típicas en minas. La metodología incluye ensayos de fatiga, análisis de la microestructura y pruebas de corrosión en soluciones salinas. Los resultados evidenciaron que la corrosión afectó significativamente la resistencia a la fatiga, reduciéndola en un 25,6% en las muestras pre-corroídas en comparación con aquellas libres de corrosión. Se destaca que el estado de corrosión aumenta las probabilidades de fallos por fatiga, sugiriendo que se debe mejorar el mantenimiento preventivo y considerar el impacto de la corrosión en el diseño de los aros mineros (DiCecco, 2014). Esta investigación constituye un antecedente fundamental para estudios futuros, al ofrecer datos cuantitativos sobre la degradación por corrosión y fatiga, información clave para el diseño de aros más seguros y duraderos en aplicaciones mineras.

Vijayan (2008) realizó una investigación en ensamblajes de aros de múltiples piezas, especialmente en vehículos mineros debido a los numerosos accidentes y fatalidades asociados a su mantenimiento. Un análisis de incidentes en minería mostró que las ruedas de tres piezas son las más propensas a fallas, especialmente durante el servicio. Las causas comunes incluyen errores humanos y deterioro mecánico de las ruedas por impactos o desgaste en entornos hostiles. Este estudio ha desarrollado modelos numéricos para evaluar el desempeño estructural y la fatiga de estas ruedas bajo cargas específicas. Para ello, se realizaron pruebas experimentales y simulaciones de elementos finitos para validar el modelo, logrando una alta concordancia (con errores entre 10% y 20%) entre los datos obtenidos experimentalmente y las simulaciones numéricas bajo condiciones de carga estática y fatiga rotacional. Los resultados apoyan la predicción de vida útil y fatiga, aunque se reconocen limitaciones debido a factores ambientales y degradación operativa que acortan la vida en campo en comparación con los modelos teóricos (Vijayan, 2008).

Este marco investigativo demuestra la necesidad de modelos numéricos y prácticas de mantenimiento mejoradas para reducir riesgos en la minería, sirviendo de base para futuras innovaciones en la seguridad de ensamblajes de ruedas.

## **1.2. Identificación y descripción del problema de estudio**

El sector minero peruano se destaca como uno de los más importantes en América Latina y en el ámbito internacional. Se posiciona como el tercer mayor productor de cobre a nivel global (Marco & Felix, 2025). El Perú se distingue por su importante actividad minera, abarcando no solo la producción de cobre, sino también de otros metales como es el caso del zinc. Esta variedad en las extracciones se evidencia en la existencia de compañías mineras con operaciones polimetálicas a nivel nacional. En este entorno, las empresas mineras disponen de una amplia variedad de maquinaria para la exploración y extracción de depósitos minerales.

Dentro de esta categoría de maquinaria, se pueden distinguir dos grandes clasificaciones: la maquinaria para minería a tajo abierto y la maquinaria para minería subterránea (conocidos como equipos *trackless*). En ambos casos, los equipos requieren de repuestos de alto rendimiento para sus operaciones. Entre estos elementos se encuentran los aros metálicos, diseñados para adaptarse a las diferentes medidas de los neumáticos de los equipos mencionados.

La necesidad de aros con una resistencia excepcional al desgaste se acentúa debido a las condiciones extremas de las operaciones mineras. La presencia de deficiencias en los aros de camiones, fabricados mediante métodos de soldadura convencionales, puede desencadenar fallos estructurales, acortar la vida útil del producto, generar un incremento significativo en los costos de mantenimiento y aumentar el riesgo de posibles accidentes.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema principal**

¿Cómo la propuesta del proceso de soldadura por arco sumergido mejora la fabricación de aros de camiones mineros 797F?

#### **1.3.2. Problemas secundarios**

- a) ¿En qué medida las variables esenciales del procedimiento de soldadura por arco sumergido contribuyen en la fabricación de aros de camiones mineros 797F?
- b) ¿Cómo se puede calificar el procedimiento de soldadura por arco sumergido y al operador del proceso según los estándares establecidos en la norma internacional ASME Sección IX?
- c) ¿Existe diferencia en costo beneficio después de la implementación del proceso de soldadura por arco sumergido en comparación con el proceso de soldadura convencional manual en la fabricación de aros de camiones mineros 797F?

### **1.4. Justificación e importancia**

En el ámbito de la ingeniería y minería, la implementación del proceso de soldadura por arco sumergido en la fabricación de aros de camiones mineros 797F es una alternativa relevante. La resistencia de los aros para camiones es fundamental para asegurar la seguridad y optimizar la eficiencia en diversas operaciones mineras, donde se enfrentan generalmente a condiciones extremas de carga y ambiente. La importancia de este trabajo radica en la necesidad de mejorar la fabricación de los aros de camiones a través de procedimientos de soldadura avanzados, como el arco sumergido para disminuir fallos estructurales, alargar la vida útil del equipo y reducir costos relacionados con el mantenimiento. Uno de los beneficiarios de esta investigación sería la industria minera, puesto que podría impulsar significativos avances en temas de seguridad y productividad.

de las operaciones mineras. Otros beneficiarios serían las empresas locales que fabrican aros para camiones, las cuales mejorarían su competitividad en el mercado.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Proponer el proceso de soldadura por arco sumergido para la mejora de la fabricación de aros de camiones mineros 797F.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- a) Determinar las variables esenciales del procedimiento de soldadura por arco sumergido en la fabricación de aros de camiones mineros 797F.
- b) Calificar el procedimiento de soldadura por arco sumergido y al operador del proceso según la norma internacional ASME sección IX.
- c) Comparar el costo beneficio de la implementación del proceso de soldadura por arco sumergido con respecto al proceso de soldadura convencional manual en la fabricación de aros de camiones mineros 797F.

## **1.6. Hipótesis**

### **1.6.1. Hipótesis general**

La propuesta del uso del proceso de soldadura por arco sumergido en la fabricación de aros de camiones mineros 797F mejorará significativamente las uniones soldadas en los aros, específicamente reduciendo defectos estructurales y aumentando la vida útil de los componentes, lo que contribuirá a una mayor eficiencia operativa y menores costos de mantenimiento en la industria minera

### 1.6.2. Hipótesis específicas

- a) Las variables esenciales del procedimiento de soldadura por arco sumergido facilitan la fabricación adecuada de aros de camiones mineros 797F.
- b) La aplicación de los criterios de calificación para el procedimiento de soldadura por arco sumergido y para el operador del proceso establecidos en la norma internacional ASME Sección IX garantizará la consistencia y fiabilidad de las uniones soldadas.
- c) Existe reducción de los costos totales de producción después de la implementación del proceso de soldadura por arco sumergido y el proceso de soldadura convencional manual en la fabricación de aros de camiones mineros 797F.

## 1.7. Variables y operacionalización de variables

### 1.7.1. Variables

Variable independiente: Proceso de soldadura por arco sumergido.

Variable dependiente: Fabricación de aros de camiones mineros 797F.

### 1.7.2. Operacionalización de variables

En la Tabla 1 se presentan de manera detallada las variables de la investigación junto con sus respectivas dimensiones e indicadores. Estos elementos han sido definidos para facilitar la medición y evaluación de los aspectos clave relacionados con la soldadura y su impacto estructural.

**Tabla 1.**  
*Variables e indicadores de la investigación*

| Operacionalización de variables   |   |                                 |                               |
|---|---|---------------------------------|-------------------------------|
| Variable  | Definición conceptual   | Dimensiones                     | Indicador                     |
| <b>Variable independiente (VI): Proceso de soldadura por arco sumergido</b> | El proceso de soldadura por arco consiste en fundir un electrodo continuo sólido, el cual está protegido por una escoria formada a partir de un fundente granulado o en polvo, junto con el metal base en la zona de soldadura. | Análisis del material base      | Rango de espesor del material |
|   |   | Análisis del material de aporte | Tipo de material de aporte    |
|   |   | Análisis de precalentamiento    | Pirómetro o tiza térmica      |

|  |   |   |  |
|--|---|---|--|
| <b>Variable dependiente (VD):</b> Fabricación de aros de camiones mineros 797F | Secuencia de pasos de manufactura en el que se ensamblan y sueldan componentes metálicos para obtener estructuras resistentes y funcionales. Este proceso involucra la selección de técnicas de soldadura, así como controles dimensionales y estructurales para garantizar su correcto desempeño en operaciones mineras. | Calificación del procedimiento de soldadura | Registro de calificación del procedimiento (PQR)             |
|  |   | Calificación del operador                   | Registro de calificación del rendimiento del soldador (WPQR) |

## 1.8. Metodología de la investigación

### 1.8.1. Unidad de análisis

El objeto de estudio comprende los aros de acero para camiones mineros modelo 797F de la marca Caterpillar.

### 1.8.2. Tipo, enfoque y nivel investigación

#### a) Tipo de investigación

La investigación será del tipo aplicada, puesto que se va poner en práctica un proceso específico, el de soldadura por arco sumergido, en un contexto industrial concreto, la fabricación de aros de camiones mineros 797F, con el objetivo de mejorar el resultado de las uniones soldadas y reducir defectos de fabricación.

#### b) Enfoque de investigación

La investigación tiene enfoque cuantitativo, debido a que se realizará una recolección y análisis de datos numéricos para analizar el efecto de la aplicación del proceso de soldadura por arco sumergido en las uniones soldadas de los aros de camiones mineros 797F, esto podría implicar mediciones de resistencia estructural, durabilidad y la

cantidad de defectos de fabricación antes y luego de la implementación del proceso de soldadura por arco sumergido.

**c) Nivel de investigación**

El nivel de investigación es descriptivo y correlacional, debido a que se centra en describir y correlacionar la propuesta de uso del proceso la soldadura por arco sumergido, con el resultado de las uniones soldadas en los aros de camiones mineros 797F, específicamente en términos de resistencia estructural, precisión en la fabricación, reducción de defectos de fabricación y costos.

**1.8.3. Diseño de investigación**

Esta investigación tiene un diseño no experimental, ya que no requiere la manipulación directa de variables independientes ni la asignación aleatoria de sujetos a distintos grupos de tratamiento. Se enfoca en observar y analizar el efecto de la implementación de un proceso específico, como la soldadura por arco sumergido, en las uniones soldadas en los aros de camiones mineros 797F, con la finalidad de evaluar si se producen mejoras significativas y reducción de defectos de fabricación.

**1.8.4. Fuente de información**

La investigación se realizará fundamentalmente con datos primarios, provenientes de la información proporcionada en los catálogos de aros de fabricantes nacionales y web de la empresa Caterpillar.

**1.8.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Los instrumentos a emplear en esta investigación serán informes, reportes de ensayos físicos, formatos de procedimientos de soldadura y calificación. Las técnicas serán basadas en los protocolos de las normas internacionales referentes a soldadura para recipientes a presión.

#### **1.8.6. Análisis y procesamiento de datos**

El análisis de datos se llevará a cabo en dos fases principales: la calificación del procedimiento de soldadura y la evaluación de la resistencia mecánica de las uniones soldadas. Se realizará un evaluación comparativa según los criterios establecidos en las normas aplicables, particularmente la norma ASME Sección IX.

## **CAPITULO II**

### **Marco teórico y marco conceptual**

#### **2.1. Marco teórico**

Esta sección proporciona los fundamentos científicos que sustentan este trabajo, abarcando conceptos clave como soldadura, procesos y calidad de la soldadura, mecanización y automatización en soldadura, normas y códigos técnicos, y calificación de procedimientos. También se analizan los vehículos industriales, diferenciando entre vehículos de carretera y fuera de carretera, con énfasis en camiones mineros. Finalmente, se aborda la clasificación, fabricación y características técnicas de los aros utilizados en estas aplicaciones.

##### **2.1.1. Soldadura**

Según la definición de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), la soldadura es un proceso de unión que logra la coalescencia de los materiales al elevarlos a la temperatura de soldadura, ya sea aplicando o no presión, y con o sin el uso de metal de aportación. La soldadura se realiza cuando piezas separadas de material a unir se combinan y forman una sola pieza cuando se aplica suficiente calor para elevar la temperatura lo necesario, provocando el ablandamiento o la fusión de las piezas, permitiendo que estas fluyan y se unan, o cuando se utiliza suficiente presión para juntar las piezas de modo que las superficies se fusionen, o también cuando se utilizan juntos suficiente calor y presión para forzar que las piezas separadas de material se combinen y formen una sola pieza (Jeffus, 2017).

La soldadura se emplea en diferentes industrias para la construcción barcos, edificios, puentes, atracciones recreativas, además, se emplea en la fabricación de automóviles, equipos agrícolas, electrodomésticos, componentes informáticos, equipos de

minería, equipos de construcción, entre otros, se debe mencionar también que los equipos ferroviarios, hornos, calderas, unidades de aire acondicionado y cientos de otros productos que utilizamos en nuestra vida diaria también se unen mediante algún tipo de proceso soldadura (Jeffus, 2017).

### **2.1.2. Procesos de soldadura**

Se utilizan comercialmente numerosos procesos de unión de metales, como soldadura por arco eléctrico, soldadura por resistencia, soldadura con gas oxicombustible, soldadura de estado sólido, soldadura de alta densidad de energía y soldadura fuerte y soldada (Antonini, 2014). De los procesos antes mencionados, la soldadura por arco eléctrico es el proceso de fusión más utilizado para unir metales. Mediante la aplicación de calor intenso, el metal en la unión entre dos partes se funde y se mezcla con un metal de aportación fundido intermedio; el calor extremo, mayor de 5000°C, necesario para fundir el metal se produce mediante un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo que se mueve a lo largo de la unión; al enfriarse y solidificarse, se produce una unión metalúrgica; debido a que la unión se realiza mediante la mezcla de la sustancia de una parte con la sustancia de otra parte, la soldadura final en la unión muestra las mismas propiedades de resistencia que los metales de ambas partes (Antonini, 2014). Esto es diferente a los procesos de unión sin fusión como son las soldadura fuerte y unión adhesiva, en los que las propiedades físicas y mecánicas de los materiales base no se duplican en la unión (Antonini, 2014). A continuación, se describirá los distintos procesos de soldadura existentes:

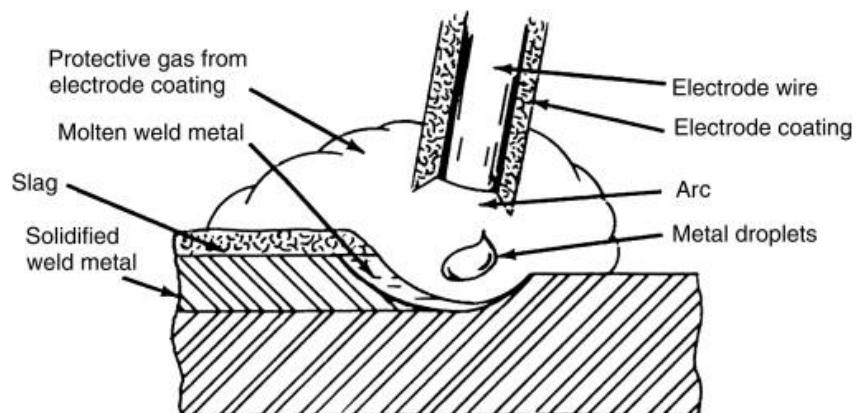
#### **2.1.2.1. Proceso de soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW)**

Este proceso también es conocido como SMAW por sus siglas en inglés de *Shielded Metal Arc Welding*. Es el proceso de soldadura por arco menos costoso, más simple y más utilizado, a menudo se la denomina como soldadura con electrodo revestido o soldadura manual por arco metálico (Antonini, 2014). Este proceso produce coalescencia

de metales calentándolos con un arco entre un electrodo de metal recubierto y la pieza de trabajo de metal base; la protección se obtiene mediante la descomposición de la cubierta del electrodo; la función principal del recubrimiento es proteger el arco y el metal caliente de reacciones químicas con los componentes de la atmósfera; en el proceso no se utiliza presión y el metal de aportación se obtiene del electrodo (Antonini, 2014). Todos los metales ferrosos se pueden soldar en todas las posiciones utilizando SMAW. El proceso de soldadura con electrodo revestido se aprecia en la Figura 1.

**Figura 1.**

Proceso de soldadura de arco con electrodo revestido - SMAW



Nota: Antonini, 2014

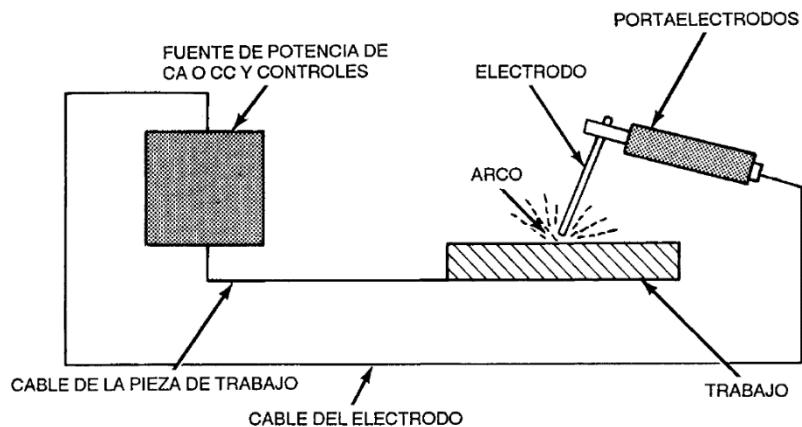
El recubrimiento del electrodo tiene varias funciones clave como: (1) protección, puesto que genera una atmósfera inerte alrededor del arco para evitar la oxidación y contaminación del metal fundido; (2) escoria protectora, debido a que forma una capa sobre el metal fundido que lo aísla del aire mientras se enfría; (3) estabilidad del arco, ya que mejora el rendimiento del arco y controla su comportamiento; y (4) aporte químico porque ajusta la composición química del metal depositado para cumplir con las propiedades mecánicas requeridas (Antonini, 2014). El proceso de soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW) es ampliamente reconocido por su versatilidad y simplicidad, lo que la convierte en una opción óptima para diversas aplicaciones en la industria y el mantenimiento.

### a) Componentes y equipo necesario para SMAW

El proceso de soldadura de arco con electrodo revestido involucra un circuito eléctrico compuesto por una fuente de potencia, cables de soldadura, un portaelectrodos, una conexión a la pieza de trabajo y el electrodo, tal como se aprecia en la Figura 2.

**Figura 2.**

Elementos de un circuito de soldadura típico para SMAW



Nota: Welding Handbook Committee, 2004

El detalle de cada elemento componente de un equipo básico para SMAW es el siguiente:

- **Fuente de potencia:** Puede ser de corriente alterna (CA) o corriente continua (CC). La elección depende del tipo de metal y del electrodo utilizado. La fuente debe proporcionar características de corriente constante para mantener un arco estable (Baghel, 2022; Welding Handbook Committee, 2004).
- **Portaelectrodos y cables:** Permiten conectar el electrodo a la fuente de energía y transmitir la corriente eléctrica (Baghel, 2022; Welding Handbook Committee, 2004).
- **Pieza de trabajo (metal base):** Debe estar limpia y preparada para garantizar una buena fusión y adherencia (Baghel, 2022).
- **Electrodos recubiertos:** Diseñados para diferentes materiales y aplicaciones, con recubrimientos específicos que cumplen funciones como proteger el arco, estabilizar

la fusión y mejorar las propiedades del depósito (Baghel, 2022; Welding Handbook Committee, 2004).

Estos electrodos se clasifican según las especificaciones de la *American Welding Society* (AWS), las cuales se detallan en la Tabla 2. Esta clasificación se basa en las propiedades mecánicas del metal de soldadura sin diluir, en la composición química, o en ambas. Los electrodos de acero al carbono, acero de baja aleación y acero inoxidable también se organizan según el tipo de corriente de soldadura (alterna o continua) con la que son más efectivos y, en algunos casos, según las posiciones de soldadura en las que pueden utilizarse (horizontal, vertical o sobre cabeza) (Welding Handbook Committee, 2004).

**Tabla 2.**  
Especificaciones según la AWS para electrodos recubiertos

| <b>Tipo de electrodo</b>          | <b>Especificación de la AWS</b> |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Acero al carbono                  | A5.1                            |
| Acero de baja aleación            | A5.5                            |
| Acero resistente a la corrosión   | A5.4                            |
| Hierro colado                     | A5.15                           |
| Aluminio y aleaciones de aluminio | A5.3                            |
| Cobre y aleaciones de cobre       | A5.6                            |
| Níquel y aleaciones de níquel     | A5.11                           |
| Recubrimiento                     | A5.13 y A5.21                   |

Nota: Welding Handbook Committee, 2004

**b) Clasificación de electrodos según la AWS para proceso SMAW**

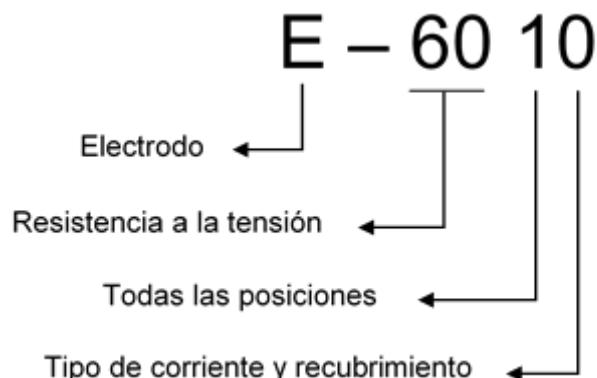
**• Para aceros al carbono**

La especificación ANSI/AWS A5.1 clasifica los electrodos de acero al carbono para el proceso SMAW utilizando un sistema de numeración sencillo y estandarizado. Por ejemplo, en la Figura 3 se tiene el electrodo E-6010, la letra E indica que es un electrodo para soldadura por arco. Los dos primeros dígitos (60) representan la resistencia mínima a la tracción del metal de soldadura, expresada en 60,000 psi. El tercer dígito (1) especifica la posición de soldadura, donde 1 indica que puede utilizarse en todas las posiciones.

Finalmente, el último dígito señala el tipo de recubrimiento del electrodo y el tipo de corriente compatible (alterna o continua) (Welding Handbook Committee, 2004).

**Figura 3.**

*Clasificación de electrodos según la AWS para el procesos SMAW – Aceros al carbono*



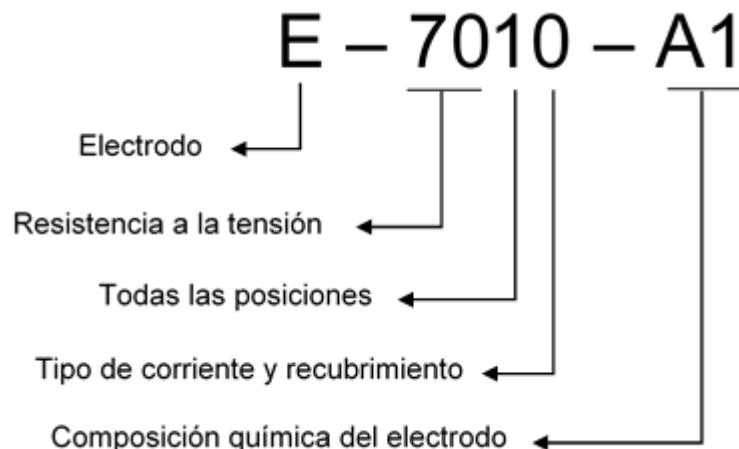
*Nota: Welding Handbook Committee, 2004*

- **Para aceros de baja aleación**

La especificación ANSI/AWS A5.5 clasifica los electrodos de acero de baja aleación utilizados en el proceso SMAW mediante un sistema de numeración similar al de los electrodos de acero al carbono. Asimismo, utiliza un sufijo en letras para señalar la composición química del metal de soldadura. Algunos de los sistemas de aleación más importantes son: acero al carbono-molibdeno (A), cromo-molibdeno (B), níquel (C) y manganeso-molibdeno (D). Los niveles de resistencia mecánica del metal de soldadura oscilan entre 70 y 120 ksi (480 a 830 MPa) en resistencia mínima a la tensión, con incrementos de 10 ksi. La Figura 4 ilustra un ejemplo de esta clasificación para aceros de baja aleación (Welding Handbook Committee, 2004).

**Figura 4.**

Clasificación de electrodos según la AWS para el procesos SMAW – Aceros de baja aleación



*Nota: Welding Handbook Committee, 2004*

### c) Principio de funcionamiento del proceso SMAW

Para el funcionamiento del proceso SMAW uno de los cables se conecta al portaelectrodos y el otro a la pieza de trabajo. La soldadura comienza cuando se establece un arco eléctrico entre la punta del electrodo y la superficie de la pieza, generando un calor intenso capaz de fundir ambos materiales. Durante el proceso, el extremo del electrodo se derrite, generando pequeñas gotas de metal derretido que se trasladan al charco de soldadura a través del chorro del arco, aportando material a medida que el electrodo se consume. Simultáneamente, el arco avanza sobre la pieza con una longitud y velocidad de desplazamiento adecuadas, lo que permite fundir y fusionar parte del metal base mientras se deposita el metal de aporte. El arco eléctrico alcanza temperaturas extremadamente altas, superiores a 5000°C, lo que permite una fusión casi instantánea del metal base al iniciarse el arco (Welding Handbook Committee, 2004).

El proceso SMAW necesita una corriente eléctrica adecuada para fundir tanto el electrodo como una parte del metal base, asegurando al mismo tiempo que exista una distancia apropiada entre la punta del electrodo y el charco de soldadura. Estos factores son esenciales para lograr la coalescencia del material. Los tipos y tamaños de electrodos determinan los requisitos de voltaje, que varían entre 16 y 40 V, y de amperaje, que oscila

entre 20 y 550 A. La corriente puede ser continua o alterna, según el electrodo, y la fuente de potencia debe controlar eficazmente estos parámetros (Welding Handbook Committee, 2004).

#### **d) Materiales aplicables y capacidades del proceso**

El proceso SMAW puede emplearse para soldar una amplia gama de metales, incluyendo los aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidables, hierro fundido, aleaciones de cobre, níquel y aluminio (Antonini, 2014). El proceso es especialmente adecuado para materiales con espesores entre 3 mm y 38 mm, aunque, con ajustes adecuados, puede utilizarse en espesores mayores o menores. SMAW también permite llevar a cabo soldaduras en cualquier posición: vertical, de cabeza, plana, u horizontal, aunque la posición plana es eficiente y fácil de controlar. Este método es utilizado en la industria de la construcción, mantenimiento, fabricación y reparación, debido a su capacidad para trabajar en condiciones adversas y en ubicaciones remotas (Antonini, 2014; Baghel, 2022).

#### **e) Procedimientos de soldadura y control de calidad**

Para lograr una soldadura de calidad, es esencial seguir procedimientos establecidos que incluyan: (1) selección del electrodo adecuado, ello dependiendo del tipo de material base y de las propiedades mecánicas requeridas; (2) ajuste del amperaje, puesto que la corriente debe ajustarse según el diámetro del electrodo y el espesor del material base; (3) control de la longitud del arco para mantener una distancia constante entre el electrodo y el material base para evitar defectos como porosidad o falta de fusión; y (5) preparación adecuada de las superficies como la limpieza para eliminar óxido, grasa o contaminantes que puedan afectar la calidad de la soldadura (Antonini, 2014; Baghel, 2022).

Los defectos más comunes en SMAW incluyen la porosidad que puede ser causada por gases atrapados en el metal fundido; las inclusiones de escoria generadas cuando la

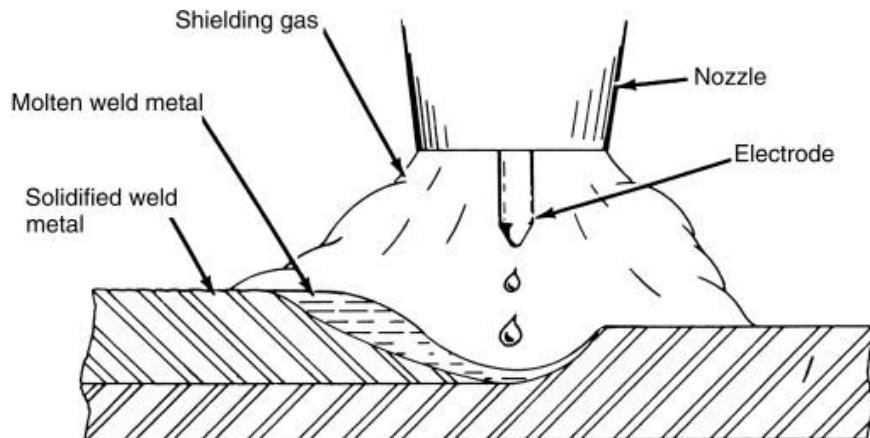
escoria no se elimina adecuadamente entre pasadas; la falta de fusión debido a una configuración incorrecta de parámetros o una técnica deficiente y el socavado que es la depresión en el borde de la soldadura, que puede reducir su resistencia. Asimismo, la inspección visual y técnicas de prueba no destructivas, como ultrasonidos o radiografías, son fundamentales para evaluar la calidad de la soldadura (Antonini, 2014).

#### 2.1.2.2. Proceso de soldadura por arco metálico con gas (GMAW)

La soldadura por arco metálico con gas (GMAW- *Gas Metal Arc Welding*) es un proceso económico y de alta velocidad que a veces se denomina soldadura con gas metálico inerte; en este proceso, se genera un arco entre el metal base y un electrodo consumible suministrado continuamente, que proporciona metal de aportación para la soldadura; el electrodo está desnudo y no contiene recubrimiento ni núcleo (Antonini, 2014). El blindaje, para proteger el metal fundido de reaccionar con los componentes de la atmósfera, es proporcionado por un gas externo, que generalmente contiene una mezcla de los siguientes: helio, argón o dióxido de carbono, con este proceso se puede generar una cantidad importante de humo al soldar y la mayor parte del humo generado se deriva del consumo del electrodo y no del metal base (Antonini, 2014). La soldadura GMAW se presenta en la Figura 5.

**Figura 5.**

Proceso de soldadura por arco metálico con gas - GMAW



Nota: Antonini, 2014

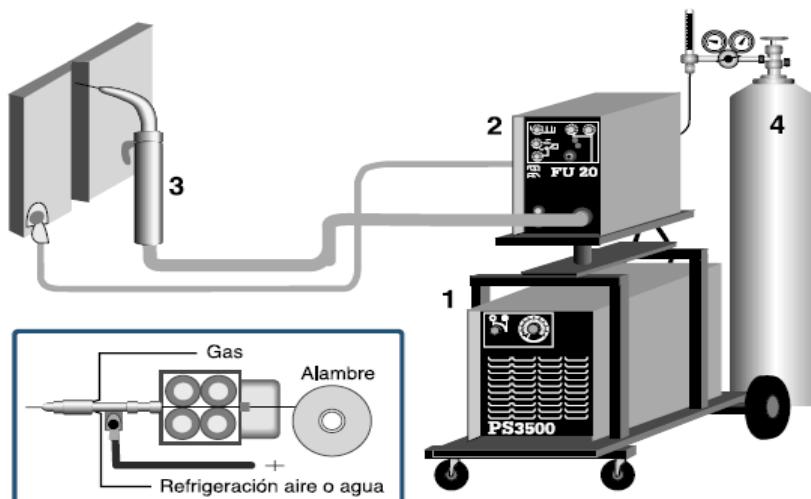
### a) Componentes del sistema GMAW

El equipo requerido para GMAW consta de varios elementos esenciales como se muestra en la Figura 6 (INDURA S.A., 2013). La información de cada elemento se detalla a continuación:

- (1) Fuente de potencia:** Esta fuente de energía eléctrica es fundamental para generar y mantener el arco durante el proceso de soldadura. Por lo general, se emplean fuentes de alimentación con características de voltaje constante, las cuales garantizan un suministro estable y adecuado para el proceso (Antonini, 2014).
- (2) Alimentador de alambre:** Suministra el electrodo continuo a una velocidad controlada, crucial para mantener la estabilidad del arco (Antonini, 2014).
- (3) Pistola soldadora:** Es el componente desde el cual se alimenta el electrodo y se suministra el gas protector. Las pistolas pueden ser enfriadas por aire o agua, dependiendo de la intensidad del trabajo (Antonini, 2014).
- (4) Sistema de gas protector:** Incluye cilindros, reguladores y mangueras para el suministro de gas, asegurando la cobertura adecuada del arco y del metal fundido (Antonini, 2014).

**Figura 6.**

Diagrama del equipo de soldadura por arco metálico con gas - GMAW



Nota: INDURA S.A., 2013

## b) Consumibles y gases protectores

Los consumibles principales en el proceso GMAW son el electrodo (en forma de alambre continuo) y el gas protector, ambos consumibles deben seleccionarse cuidadosamente para garantizar resultados óptimos.

- **Gases protectores**

Su función principal es proteger el metal fundido del oxígeno y otros contaminantes del aire. Los gases más comunes incluyen el argón que es ideal para soldar metales no ferrosos como aluminio y cobre, produce un arco estable y uniforme; el helio que mejora la penetración y el flujo térmico, aunque su costo es elevado; el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que es económico y utilizado en soldadura de aceros al carbono, pero genera mayor cantidad de salpicaduras; y la mezclas de gases cuyas combinaciones de argón y  $\text{CO}_2$  o argón y helio se emplean para equilibrar estabilidad del arco, penetración y reducción de salpicaduras (Antonini, 2014).

- **Electrodos**

Los electrodos, o metales de aporte, utilizados en el proceso GMAW están regulados por especificaciones de la AWS bajo las normas A5.XX (Ver Tabla 3). Estas especificaciones detallan requisitos como tamaño, tolerancias, empaque, composición química y, en ocasiones, propiedades mecánicas. En aplicaciones de unión, la composición del electrodo generalmente coincide con la del metal base, aunque puede modificarse ligeramente para compensar las pérdidas en el arco o para desoxidar el charco de soldadura. En ciertas aplicaciones, se requiere un electrodo con una composición química diferente para garantizar buenas propiedades y características de soldadura (Welding Handbook Committee, 2004).

Los electrodos para GMAW son más pequeños que los de soldadura por arco sumergido, con diámetros que varían entre 0,5 mm (0.020") y 3,2 mm (1/8"), siendo

comunes entre 0,9 mm (0.035") y 1,6 mm (0.062"). Debido a su pequeño tamaño y las altas corrientes empleadas, las velocidades de alimentación del alambre son elevadas, alcanzando entre 40 y 340 mm/s (100 a 800 pulgadas/minuto) en la mayoría de los casos, excepto para metales como el magnesio, que pueden requerir hasta 590 mm/s (1400 pulgadas/minuto), esto asegura un suministro continuo y eficiente del metal de aporte durante el proceso de soldadura (Welding Handbook Committee, 2004).

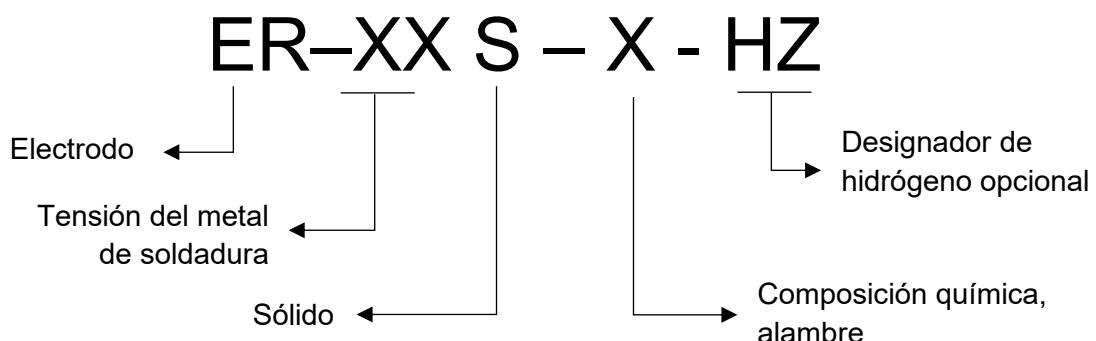
**Tabla 3.**  
Especificaciones según la AWS para electrodos para el proceso GMAW

| Tipo de material base            | Especificación de la AWS |
|----------------------------------|--------------------------|
| Acero al carbono                 | A5.18                    |
| Acero de baja aleación           | A5.28                    |
| Aleaciones de aluminio           | A5.10                    |
| Aleaciones de cobre              | A5.7                     |
| Magnesio                         | A5.19                    |
| Aleaciones de níquel             | A5.14                    |
| Acero inoxidable de la serie 300 | A5.9                     |
| Acero inoxidable de la serie 400 | A5.9                     |
| Titanio                          | A5.16                    |

Nota.: Welding Handbook Committee, 2004

En la clasificación de electrodos según la AWS para proceso GMAW se tiene lo mostrado en la Figura 7.

**Figura 7.**  
Clasificación de electrodo de acero al carbono para GMAW



Nota.: Welding Handbook Committee, 2004

### **c) Aplicaciones del proceso GMAW**

El proceso de soldadura GMAW es utilizado en el sector industrial por su versatilidad para soldar diversos materiales, como aceros al carbono, ideales para estructuras y componentes metálicos generales; aluminio y sus aleaciones, que requieren una cuidadosa selección de gases y parámetros; y aceros inoxidables junto con aleaciones especiales, que se benefician del uso de mezclas de gases específicas para prevenir la oxidación. Gracias a su capacidad para realizar soldaduras continuas y su facilidad de automatización, el GMAW resulta especialmente eficiente en aplicaciones de alta producción, optimizando tiempos y mejorando la productividad en procesos industriales (Welding Handbook Committee, 2004).

### **d) Parámetros operativos**

El éxito de GMAW depende de la configuración adecuada de varios parámetros clave como: (a) el voltaje que controla la longitud del arco y la forma del cordón; (b) velocidad de alimentación del alambre influye en la estabilidad del arco y en la cantidad de material depositado; (c) velocidad de soldadura, el cual influye en la calidad del cordón y la penetración; y (d) el flujo del gas protector que debe ajustarse para cubrir eficazmente el arco y el metal fundido. Estos parámetros varían según el tipo de material, la posición de soldadura y las condiciones ambientales (Welding Handbook Committee, 2004).

### **e) Calidad y control del proceso**

La soldadura GMAW destaca por su alto nivel de control en el proceso, aunque pueden presentarse defectos como porosidad, inclusiones de óxido o falta de fusión. Estos problemas suelen estar relacionados con configuraciones inadecuadas del gas de protección o del equipo utilizado. Para garantizar la calidad de las uniones soldadas, es fundamental realizar inspecciones visuales y aplicar pruebas no destructivas, que permiten identificar y corregir posibles fallas sin comprometer la integridad de los materiales (Welding Handbook Committee, 2004).

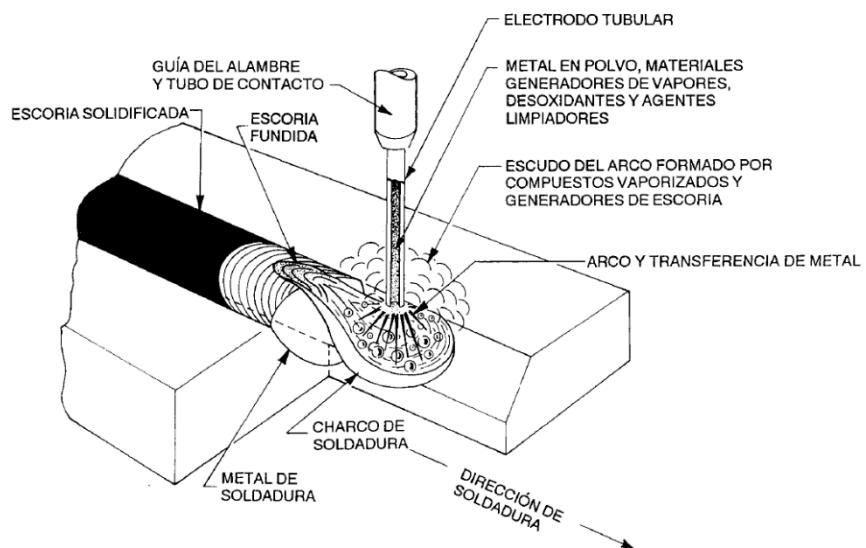
### 2.1.2.3. Proceso de soldadura por arco eléctrico con núcleo fundente (FCAW)

La soldadura por arco con núcleo de fundente (*Flux-Cored Arc Welding*, FCAW) es un método de soldadura que emplea un electrodo tubular continuo relleno de materiales fundentes. Este núcleo permite generar protección contra la contaminación ambiental, mejorar las propiedades del metal depositado y estabilizar el arco. Es una técnica versátil que combina características de otros métodos como el SMAW (soldadura con electrodo revestido) y el GMAW (soldadura con gas y alambre continuo) (Antonini, 2014). Existen dos variantes principales y son las siguientes:

**(1) FCAW con autoprotección (FCAW-S):** No requiere gas protector externo, ya que los materiales dentro del núcleo generan gases protectores y forman escoria (Welding Handbook Committee, 2004), ver Figura 8.

**Figura 8.**

*Soldadura por arco con núcleo de fundente y autoprotección*

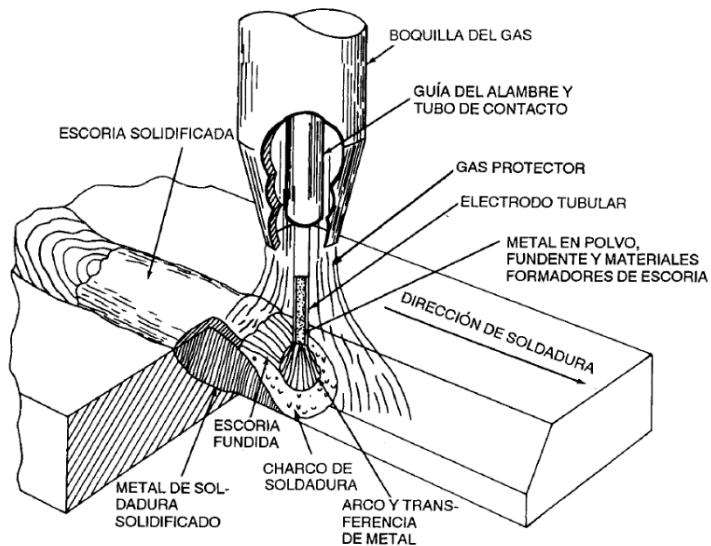


Nota: Welding Handbook Committee, 2004

**(2) FCAW con gas protector externo (FCAW-G):** Emplea gases adicionales, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o mezclas con argón, para mejorar la estabilidad del arco y la calidad del depósito metálico (Welding Handbook Committee, 2004). La Figura 9 muestra el proceso FCAW con gas de protección externo (FCAW-G).

**Figura 9.**

Soldadura por arco con núcleo de fundente protegida con gas



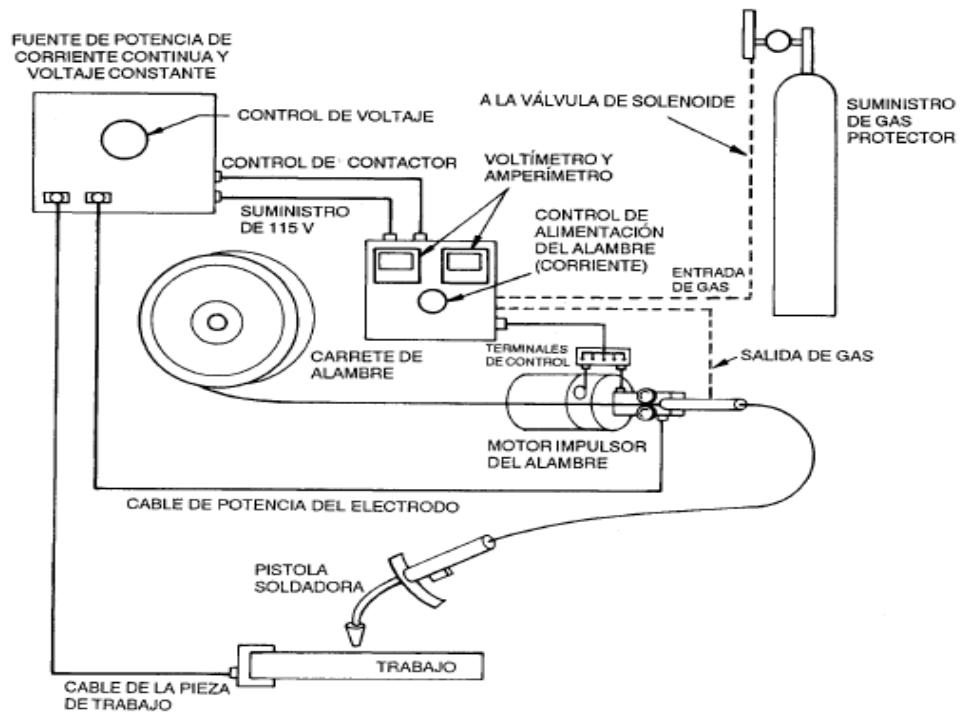
Nota: Welding Handbook Committee, 2004

### a) Componentes del equipo FCAW

El equipo para este proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente consta de varios elementos clave como se aprecia en la Figura 10.

**Figura 10.**

Equipo típico para soldadura por arco con núcleo de fundente semiautomática



Nota: Welding Handbook Committee, 2004

La descripción de cada elemento es el siguiente:

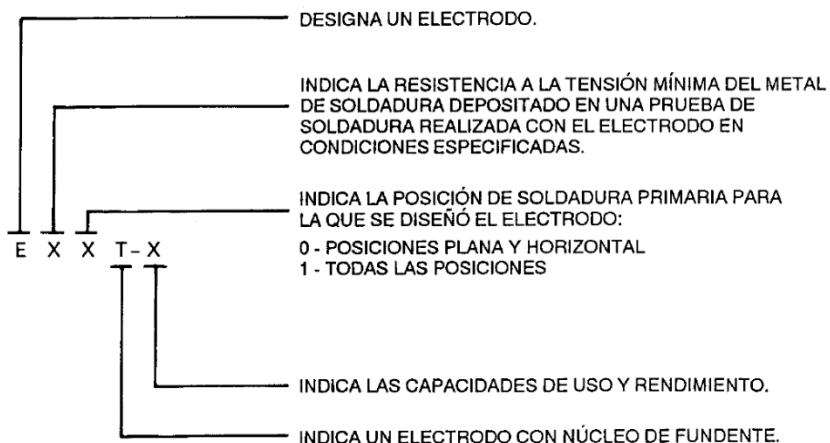
- (1) Fuente de energía:** Generalmente una fuente de corriente continua (CC) con características de voltaje constante, que asegura un arco estable y uniforme (Welding Handbook Committee, 2004).
- (2) Alimentador de alambre:** Proporciona un suministro constante del electrodo al arco (Welding Handbook Committee, 2004).
- (3) Pistola soldadora:** Diseñada para transportar el alambre y, en su caso, el gas protector hacia el área de soldadura (Welding Handbook Committee, 2004).
- (4) Sistema de gas protector (en FCAW-G):** Utiliza cilindros y reguladores para proporcionar una protección constante y efectiva al charco de soldadura (Welding Handbook Committee, 2004).

**b) Electrodos tubulares y función del núcleo**

El electrodo tubular en FCAW desempeña múltiples funciones esenciales para la calidad de la soldadura como: protección, puesto que los materiales dentro del núcleo generan gases que protegen el charco de soldadura contra contaminantes como oxígeno y nitrógeno; formación de escoria que actúa como una capa protectora que controla la solidificación del metal fundido; y aportan elementos químicos que mejoran las propiedades mecánicas del depósito, como la ductilidad y resistencia. Los electrodos varían en composición y tamaño, siendo su elección determinada por el tipo de material base, la posición de soldadura y las condiciones del entorno (Welding Handbook Committee, 2004). La identificación del electrodo para FCAW se aprecia en la Figura 11.

**Figura 11.**

Sistema de identificación para electrodos de acero dulce para FCAW



Nota.: *Welding Handbook Committee, 2004*

### c) Aplicaciones del FCAW

El proceso FCAW es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales gracias a su alta productividad y adaptabilidad. Entre sus usos más comunes destacan la construcción estructural, siendo ideal para la fabricación de puentes y estructuras metálicas pesadas; la fabricación industrial, aplicada en la producción de equipos de gran tamaño, recipientes a presión y tuberías; y trabajos en ambientes exteriores, donde la variante FCAW-S resulta adecuada al no depender de gases de protección, lo que lo hace eficiente incluso en condiciones de viento. Además, este proceso es compatible con diversos materiales, como aceros al carbono, inoxidables y de baja aleación, y puede realizarse en todas las posiciones de soldadura (Welding Handbook Committee, 2004).

### d) Parámetros operativos y control del proceso

El control preciso de los parámetros es fundamental para asegurar la calidad de la soldadura. Los principales parámetros a considerar son: (1) amperaje y voltaje, que influyen en la penetración y la estabilidad del arco; (2) velocidad de alimentación del alambre, que afecta la tasa de deposición y la uniformidad del cordón; (3) flujo del gas protector, especialmente en el proceso FCAW-G, donde un flujo adecuado previene defectos como la porosidad; y (4) distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo, dado que

es fundamental una longitud de arco constante para evitar inclusiones de escoria y otros defectos. Configurar correctamente estos parámetros garantiza uniones soldadas de alta calidad y reduce el riesgo de imperfecciones (Welding Handbook Committee, 2004).

#### e) Ventajas y limitaciones del FCAW

El proceso FCAW ofrece varias ventajas destacadas, como una alta tasa de deposición que permite realizar soldaduras más rápidas y eficientes, su versatilidad para adaptarse a diferentes posiciones y condiciones de soldadura, y su uso en exteriores, especialmente con la variante FCAW-S, que no requiere gas adicional, lo que la hace ideal para trabajos al aire libre. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones, como la generación de humos, ya que produce mayores emisiones en comparación con otros métodos, la dependencia de un equipo específico, que requiere una fuente de energía y alimentador adecuados, y un mayor consumo de consumibles, especialmente en la variante con gas protector (Welding Handbook Committee, 2004).

#### 2.1.2.4. Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW)

La soldadura por arco sumergido (SAW- *Submerged Arc Welding*) es un proceso de unión de metales que emplea calor producido por un arco eléctrico entre un electrodo metálico sin recubrimiento y la pieza de trabajo. Este arco se encuentra completamente cubierto por una capa de fundente granular que protege el metal fundido del contacto con la atmósfera. En este método, no se aplica presión, y el material de aporte proviene del electrodo o, en algunos casos, de un suministro adicional como varillas metálicas o gránulos (Antonini, 2014).

El fundente desempeña una función importante en el proceso porque da estabilidad al arco, permite controlar las propiedades químicas y mecánicas del depósito metálico y afecta de manera directa la calidad de la soldadura, dependiendo de su manejo. Asimismo, el proceso SAW permite trabajar con corrientes de hasta 2000 amperios, tanto en corriente alterna (CA) como en corriente continua (CC). Además, es posible combinar fuentes de

potencia CA y CC en la misma operación para incrementar la flexibilidad del proceso (Welding Handbook Committee, 2004).

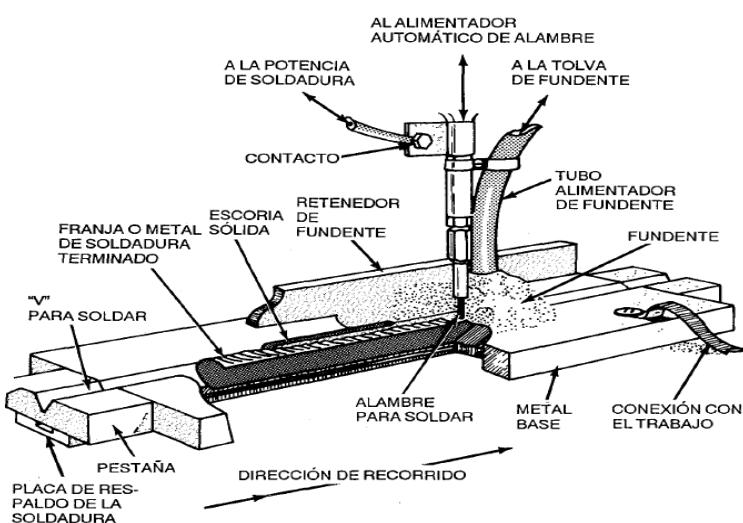
### a) Principios de funcionamiento del proceso SAW

El proceso de arco sumergido se muestra en la Figura 12. Su funcionamiento consiste en que el electrodo metálico continuo se fija en una acumulación de fundente que cubre la unión a soldar. Una vez iniciado el arco (mediante uno de varios métodos específicos), el alimentador de alambre introduce el electrodo a una velocidad constante durante su recorrido a lo largo de la soldadura, de forma manual o automática. El fundente adicional se distribuye constantemente alrededor y por delante del electrodo, protegiendo el arco y el metal fundido de contaminantes atmosféricos. El calor generado derrite el fundente, el extremo del electrodo y los bordes del metal base, formando un charco de metal fundido bajo una capa de escoria líquida (Welding Handbook Committee, 2004).

El fundente tiene múltiples funciones como: conducir electricidad del electrodo al metal base; proteger el baño fundido del aire; y disolver impurezas y agregar elementos de aleación si es necesario. A medida que el proceso avanza, el metal y la escoria se solidifican, creando una franja de soldadura con una capa de escoria protectora que debe eliminarse antes de cualquier pasada adicional (Welding Handbook Committee, 2004).

**Figura 12.**

Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido



Nota.: Welding Handbook Committee, 2004

**b) Métodos generales de aplicación del proceso SAW**

El SAW puede realizarse mediante tres enfoques principales:

**(1) Soldadura semiautomática**

- Utiliza una pistola de mano que alimenta el electrodo y aplica el fundente, ya sea a través de gravedad o mediante un sistema presurizado.
- Se emplean electrodos de menor diámetro y velocidades moderadas, con desplazamientos manuales o mediante motores pequeños.

**(2) Soldadura automática**

- Realizada con equipos completamente automatizados que no requieren supervisión constante del operador.
- Es ideal para aplicaciones de alta producción, donde los costos del equipo se justifican por el incremento en la eficiencia.

**(3) Soldadura mecanizada**

- Similar a la soldadura automática, pero con la intervención del operador para tareas como posicionar la pieza, iniciar o detener el proceso, y ajustar controles.

**c) Componentes del equipo SAW**

El proceso de soldadura por arco sumergido requiere de equipos especializados que garantizan la calidad de la unión y un control preciso del proceso. Estos componentes básicos incluyen: la fuente de potencia, el sistema de alimentación del electrodo, la distribución de fundente, los mecanismos de desplazamiento y el sistema de control del proceso, además, existen equipos accesorios opcionales, como los sistemas de recuperación de fundente, los posicionadores, manipuladores y viradores (Welding Handbook Committee, 2004). La descripción de los componentes de SAW se describe a continuación:

**(1) Fuente de potencia:** Su elección es esencial en las operaciones de SAW ya que debe ser capaz de manejar corrientes elevadas y ciclos de trabajo prolongados. Las fuentes más comunes son de corriente continua (CC) y corriente alterna (CA), con diferentes

tipos de salida: voltaje constante (CV), corriente constante (CC) o combinaciones CV/CC. Las fuentes de potencia CC con voltaje constante, como los modelos transformador-rectificador y motor-generador, son ideales para aplicaciones de acero delgado a alta velocidad, ajustando automáticamente el arco sin controles complejos. Las fuentes de CC con corriente constante, aunque menos comunes, son útiles en aplicaciones de alta precisión y requieren un sistema de alimentación variable del electrodo. Las fuentes combinadas CV/CC ofrecen versatilidad, permitiendo alternar entre modos, y son ideales para aplicaciones como SMAW, GMAW y FCAW. Por otro lado, las fuentes de potencia de CA, generalmente transformadores con especificaciones de 800 a 1500 amperios, son ideales para aplicaciones de alta corriente y soldadura de uniones estrechas, además de ser compatibles con una variedad de fundentes (Welding Handbook Committee, 2004).

- (2) **Controles del proceso:** Regulan parámetros clave como la velocidad del electrodo y el voltaje del arco. Existen dos tipos principales: los controles analógicos que son simples y robustos, adecuados para sistemas semiautomáticos, pueden presentar limitaciones en términos de precisión y estabilidad; y los controles Digitales que están basados en microprocesadores, ofrecen ajustes precisos y funciones avanzadas como llenado de cráteres y detección de retro quemado. Son más complejos y compatibles únicamente con fuentes de voltaje constante (Welding Handbook Committee, 2004).
- (3) **Cabezas y sopletes de soldadura:** Incluyen el motor alimentador, los rodillos impulsores del alambre, el soplete y boquilla de fundente. Los diseños modernos permiten manejar diversos tamaños de alambre o tiras metálicas, con opciones para aplicaciones estándar, de surco angosto o con electrodos de tira. Estas cabezas también facilitan la alimentación uniforme del fundente, maximizando la eficiencia y reduciendo defectos en la soldadura (Welding Handbook Committee, 2004).
- d) **Equipo accesorio**

Los equipos que se usan con frecuencia en SAW son los siguientes:

### **(1) Sistemas de desplazamiento**

- Carros tipo tractor: Compactos y transportables, ideales para soldar en el campo.
- Carros de riel lateral: Más adecuados para talleres, permiten movimientos lineales rápidos en piezas de trabajo fijas.
- Manipuladores: Ofrecen desplazamiento en tres ejes, proporcionando máxima versatilidad para trabajos complejos.

### **(2) Unidades de recuperación de fundente**

- Recuperan y procesan el fundente no utilizado, separando escoria y eliminando partículas indeseadas.
- Mantienen el fundente seco mediante sistemas de calentamiento integrados.

### **(3) Posicionadores y fijaciones**

- Permiten colocar piezas de trabajo en posición plana para cumplir con las limitaciones del proceso SAW.
- Incluyen rodillos giratorios, unidades de inclinación y fijaciones personalizadas para mantener fija la pieza mientras se realiza la soldadura.

#### **e) Materiales para el proceso SAW**

La soldadura por arco sumergido se utiliza para ensamblar una gran diversidad de materiales modernos, que van desde aleaciones avanzadas de níquel hasta aceros al carbono comunes. La mayoría de los aceros y aleaciones pueden soldarse sin dificultad empleando alambres y fundentes disponibles en el mercado. Sin embargo, ciertos materiales necesitan alambres de electrodo con composiciones químicas específicas y fundentes diseñados para proporcionar propiedades particulares a la unión soldada (Welding Handbook Committee, 2004). Dentro de los materiales para SAW tenemos:

- (1) Metales base:** El proceso de soldadura por arco sumergido es compatible como una gama amplia de metales base, los cuales se agrupan en varias categorías generales

según su composición y propiedades. Entre ellos se encuentran los aceros al carbono con un contenido máximo de carbono del 0,29%. También incluye aceros de baja aleación, que destacan por su resistencia a la fluencia de hasta 100 ksi (690 MPa), y aceros al cromo-molibdeno, que contienen entre 0,5 y 9% de cromo y 0,5 a 1% de molibdeno. Asimismo, este proceso es adecuado para aceros inoxidables y aleaciones a base de níquel, utilizadas en entornos extremos por su resistencia térmica y mecánica (Welding Handbook Committee, 2004).

**(2) Electrodos:** El rango de aleaciones que pueden soldarse mediante este método ha crecido gracias al desarrollo de electrodos y fundentes específicos. Las combinaciones de alambre y fundente suelen clasificarse de acuerdo con las especificaciones de un código, y para metales base menos comunes, los fabricantes de fundentes proporcionan datos sobre combinaciones especiales de alambre y fundente. Los electrodos para soldadura por arco sumergido están diseñados para adaptarse a diversos metales base, como aceros al carbono, de baja y alta aleación, inoxidables, aleaciones de níquel y materiales para recubrimientos. Están disponibles como alambres sólidos desnudos o electrodos compuestos con núcleo metálico, ideales para aleaciones complejas al encapsular los elementos de aleación necesarios dentro de un tubo metálico (Welding Handbook Committee, 2004).

Generalmente, se presentan en carretes o bobinas de 11 a 454 kg, siendo los formatos más grandes más eficientes y económicos al reducir el desperdicio de material. Muchos electrodos de acero tienen un recubrimiento de cobre que mejora la conductividad eléctrica, reduce el desgaste y prolonga su vida útil en almacenamiento. Este recubrimiento no se utiliza en materiales resistentes a la corrosión o aplicaciones nucleares específicas. El diámetro de los electrodos varía entre 1,6 y 6,4 mm (1/16 a 1/4 de pulgada), y su rango de amperaje sigue pautas generales. Los empaques están diseñados para una conservación prolongada en condiciones normales de almacenamiento, asegurando la calidad del material hasta su uso. Estas características hacen de los electrodos un componente esencial para garantizar

eficiencia y calidad en la soldadura por arco sumergido (Welding Handbook Committee, 2004). En la Tabla 4 se presentan los diámetros de los alambres con respectivos intervalos de corriente.

**Tabla 4.**  
Alambres para SAW – diámetros e intervalo de corriente

| Diámetro del alambre |      | Intervalo de corriente |
|----------------------|------|------------------------|
| mm                   | Pulg | Amperaje               |
| 1,6                  | 1/16 | 150-350                |
| 2,0                  | 5/64 | 200-500                |
| 2,4                  | 3/32 | 300-600                |
| 3,2                  | 1/8  | 350-800                |
| 4,0                  | 5/32 | 400-900                |
| 4,8                  | 3/16 | 500-1200               |
| 5,6                  | 7/32 | 600-1300               |
| 6,4                  | 1/4  | 700-1600               |

Nota: Welding Handbook Committee, 2004

**(3) Fundentes:** Los fundentes desempeñan un papel crucial al aislar el charco de soldadura del contacto con la atmósfera, formando cierta capa de escoria fundida sobre el metal. Además, ayudan a limpiar el charco de soldadura, afectan las propiedades mecánicas de la soldadura y modifican la composición química del metal. Los fundentes están compuestos por minerales granulares que se mezclan según diversas fórmulas, y pueden fusionarse, aglomerarse o mezclarse de manera mecánica, dependiendo del método de fabricación (Welding Handbook Committee, 2004).

La homogeneidad en el tamaño de las partículas de los fundentes resulta esencial, ya que influye en la alimentación, recuperación y calidad de la soldadura. Para amperajes altos, se recomienda un tamaño de partícula más pequeño. Si se utiliza un fundente demasiado fino, puede afectar el flujo adecuado en el sistema de alimentación y causar problemas en la soldadura. Para la utilización de los fundentes, estos deben mantenerse secos, especialmente los aglomerados que contienen agua de hidratación, para evitar problemas como la absorción de hidrógeno. También es crucial mantener una proporción adecuada entre el fundente y el electrodo para garantizar

una composición consistente del metal de soldadura (Welding Handbook Committee, 2004).

Los fundentes se pueden clasificar según su acidez o basicidad, los fundentes básicos tienen una proporción alta de óxidos como MgO o CaO, y son ideales para aplicaciones de soldadura que requieren un control preciso de la composición del metal. En la actualidad, los fundentes básicos son los más utilizados en aplicaciones críticas de soldadura (Welding Handbook Committee, 2004). Entre los fundentes se tienen:

- **Fundentes fusionados:** Se producen al mezclar materias primas en estado seco, para luego someter la mezcla a fusión en un horno eléctrico. Tras alcanzar la fusión, se enfriá rápidamente, creando un producto vítreo que se tritura, clasifica y empaca. Sus ventajas incluyen una buena homogeneidad química, fácil eliminación de polvo fino, y facilidad de manejo y almacenamiento, ya que no son higroscópicos. Además, se pueden reciclar fácilmente sin que cambien significativamente sus características. Sin embargo, su principal desventaja es la dificultad para añadir desoxidantes o ferroaleaciones durante su fabricación sin que ocurra segregación o pérdidas significativas (Welding Handbook Committee, 2004).
- **Fundentes aglomerados:** Se fabrican pulverizando materias primas, mezclándolas con silicato de potasio o sodio, y luego aglomerándolas. La mezcla en estado húmedo se transforma en pequeñas esferas que se calientan a temperaturas inferiores a las utilizadas en la fusión de los fundentes. Este tipo de fundentes permiten agregar fácilmente desoxidantes y elementos de aleación, y también se pueden identificar por su color. Sin embargo, tienen desventajas, como la tendencia a absorber humedad y generar gases durante la soldadura, además de que la composición del fundente puede cambiar debido a la segregación (Welding Handbook Committee, 2004).

- **Fundentes mezclados mecánicamente:** Se obtienen al combinar entre 2 o mayor cantidad de fundentes fusionados o aglomerados para obtener características específicas. Esta mezcla permite personalizar el fundente para aplicaciones de soldadura muy críticas, pero presenta inconvenientes como la segregación durante el almacenamiento, el manejo y la operación, así como la inconsistencia entre diferentes lotes de mezcla (Welding Handbook Committee, 2004).

#### f) Soldadura de materiales de acero al carbono

La soldadura de aceros al carbono generalmente se realiza con combinaciones de electrodos y fundentes conforme a lo establecido en la norma AWS A5.17, la cual regula los consumibles de acero al carbono empleados en soldadura por arco sumergido. La Tabla 5 presenta los valores mínimos de propiedades mecánicas para distintas combinaciones de alambre y fundente. Al elegir los consumibles para soldadura por arco sumergido, es esencial que tanto la resistencia mínima a la tracción y al rendimiento, como las propiedades de tenacidad, coincidan con las del metal base (Welding Handbook Committee, 2004).

**Tabla 5.**

Propiedades mecánicas mínimas con consumibles de acero al carbono cubiertos fuente: AWS A5.17

| Clasificación AWS | Condición de soldadura | Resistencia a la tensión (KSI y MPA) |     | Resistencia al vencimiento (KSI y MPA) |     | % de alargamiento en 2 pulg | Valores Charpy de impacto (pies-Lb) (Joules) |    | Temp. de prueba |
|-------------------|------------------------|--------------------------------------|-----|--|-----|-----------------------------|--|----|-----------------|
| F6A2-EL12         | AW                     | 60                                   | 414 | 48                                     | 331 | 22                          | 20   | 27 | (-29°C) -20°F   |
| F6A2-EL12         | AW                     | 60                                   | 414 | 48                                     | 331 | 22                          | 20   | 27 | (-51°C) -60°F   |
| F7A2-EL12         | AW                     | 70                                   | 483 | 58                                     | 400 | 22                          | 20   | 27 | (-29°C) -20°F   |
| F6P4-EM12K        | SR                     | 60                                   | 414 | 48                                     | 331 | 22                          | 20   | 27 | (-40°C) -40°F   |
| F7A2-EM12K        | AW                     | 70                                   | 483 | 58                                     | 400 | 22                          | 20   | 27 | (-29°C) -20°F   |
| F7A6-EM12K        | AW                     | 70                                   | 483 | 58                                     | 400 | 22                          | 20   | 27 | (-51°C) -60°F   |
| F7A2-EH14         | AW                     | 70                                   | 483 | 58                                     | 400 | 22                          | 20   | 27 | (-29°C) -20°F   |

Nota.: Welding Handbook Committee, 2004

#### g) Electrodos y fundentes de acero al carbono

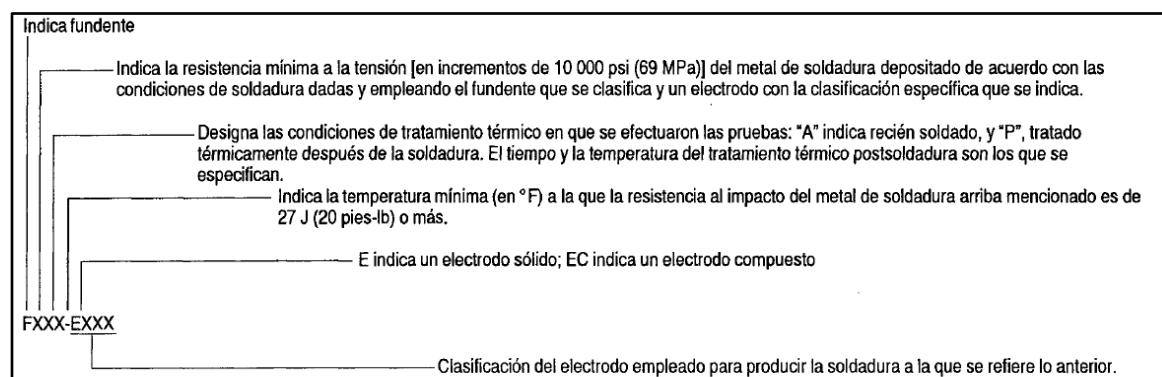
La norma AWS A5.17 establece los criterios que deben cumplir los electrodos y fundentes empleados en la soldadura por arco sumergido (SAW) de aceros al carbono. La clasificación de los electrodos se basa en su composición química, mientras que la de los

fundentes depende de las características que confieren al metal depositado. Los aceros al carbono poseen una cantidad limitada de manganeso, silicio, carbono y cobre. La elección de los consumibles depende de las propiedades químicas y mecánicas deseadas, la posición de soldadura y la preparación de la superficie del acero (Welding Handbook Committee, 2004).

Los consumibles disponibles son combinaciones de electrodos y fundentes formulados para cumplir con requisitos específicos. Se debe decidir entre un fundente "neutral", que no introduce aleaciones adicionales, o un fundente "activo", que sí lo hace. Los fundentes activos se recomiendan principalmente para aplicaciones de una sola pasada, ya que su empleo en soldaduras de múltiples pasadas puede estar limitado por normativa, debido a la posible concentración excesiva de elementos aleantes en el metal aportado. Por otro lado, la elección del electrodo tiene una influencia más directa en la composición química del metal usado para soldadura, mientras que el fundente afecta propiedades como la tenacidad al impacto, la resistencia mecánica y la facilidad del proceso de soldado. También es fundamental que la combinación electrodo/fundente sea adecuada para mojar las paredes de la unión sin causar defectos y sea capaz de soldar sobre superficies con impurezas, además de permitir la fácil remoción de la escoria (Welding Handbook Committee, 2004). La Figura 13 presenta el sistema de clasificación para las combinaciones de fundente y electrodo.

**Figura 13.**

Sistema de clasificación para combinaciones fundente electrodo fuente: AWS A5.17



Nota: Welding Handbook Committee, 2004

## **h) Usos comunes del proceso SAW**

La soldadura por arco sumergido (SAW) es utilizado en una gran diversidad de aplicaciones industriales debido a su capacidad para producir soldaduras de buena calidad, penetración profunda y con altas velocidades de deposición, además de ser adecuada para operaciones automáticas. Este proceso es ideal para fabricar ensamblajes soldados de gran tamaño, como barcos, barcazas, carros de ferrocarril, tuberías, recipientes a presión y estructuras que necesiten soldaduras largas. También se emplea en instalaciones automáticas para producir en masa ensamblajes con soldaduras cortas repetitivas (American Welding Society, 1996).

SAW es un proceso versátil, adecuado para soldar desde láminas finas de 1.5 mm hasta materiales pesados y gruesos. Sin embargo, no es adecuada para todos los metales y aleaciones, aunque es comúnmente usada con aceros estructurales de baja aleación, aceros inoxidables y aceros al carbono. Además, se emplea para unir ciertos aceros de alto carbono, aceros de alta resistencia y aleaciones de níquel, aunque en ciertos casos, procesos que aplican menos calor al metal base, como la soldadura por arco de metal y gas, pueden ofrecer mejores propiedades de unión. SAW se utiliza principalmente para realizar uniones a tope en posición plana, para recubrimientos en la posición plana, así como para soldaduras de filete en las posiciones plana y horizontal. Si se dispone del equipo adecuado, también es posible soldar uniones traslapadas y a tope en la posición horizontal (American Welding Society, 1996).

## **i) Variables de operación en el proceso SAW**

Para conseguir soldaduras de excelente calidad y mantener altas tasas de producción es crucial controlar las variables de operación en SAW. Las principales variables son:

**(1) Amperaje de soldadura:** Determina la velocidad de fusión del electrodo, afectando la tasa de deposición, la penetración y la cantidad de metal base fundido. Si la corriente es demasiado alta, puede causar una penetración excesiva y distorsiones por la

contracción del metal. Por otro lado, una corriente baja puede resultar en penetración insuficiente y fusión incompleta (American Welding Society, 1996).

- (2) **Velocidad de soldadura:** La velocidad de desplazamiento tiene un impacto mayor en la penetración que otras variables, salvo la corriente. Velocidades muy bajas pueden amortiguar la penetración, mientras que velocidades excesivas pueden causar socavamiento. La velocidad también se debe ajustar para controlar el tamaño y la forma de la soldadura (American Welding Society, 1996).
- (3) **Tamaño del electrodo:** Influye en la penetración y forma de la soldadura. Los electrodos más pequeños se utilizan en equipos semiautomáticos y para mejorar la flexibilidad de movimiento, mientras que los más grandes son adecuados para cubrir aberturas más amplias y ofrecen una mayor tasa de deposición a amperajes altos (American Welding Society, 1996).
- (4) **Extensión del electrodo:** Se vuelve importante cuando se tiene una alta densidad de corriente. A medida que se incrementa la extensión, la penetración de la soldadura disminuye y la tasa de fusión del electrodo aumenta. Además, una extensión larga aumenta la resistencia en el circuito de soldadura, reduciendo la penetración de la franja y la anchura. Para mantener una penetración adecuada, el voltaje debe ajustarse si se incrementa la extensión (American Welding Society, 1996).
- (5) **Espesor y anchura de la capa de fundente:** El espesor y la distribución del fundente afectan la calidad y apariencia de la soldadura. Una capa de fundente demasiado gruesa puede restringir el arco, causando una soldadura áspera y dificultando la salida de los gases. Una capa demasiado delgada puede causar destellos y porosidad. El espesor ideal se logra ajustando gradualmente el flujo de fundente hasta que el arco quede totalmente cubierto sin generar destellos. Además, el fundente debe mantenerse libre de contaminantes para evitar problemas como la porosidad (American Welding Society, 1996).

## j) Procedimiento de soldadura

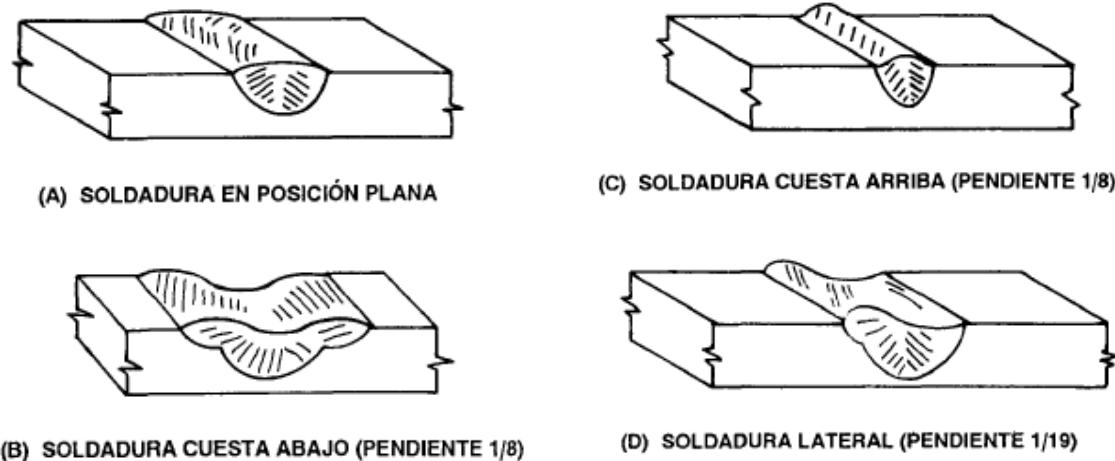
Para maximizar la producción en el proceso de soldadura, se debe prestar atención a las operaciones iniciales a la soldadura, las cuales se detallan a continuación:

- (1) Diseño de uniones y preparación de bordes:** Para SAW las uniones más comunes son a tope, en "T" y traslapadas. La preparación de los bordes debe ser precisa para evitar distorsiones y mejorar la penetración de la soldadura. Las aberturas de raíz deben estar entre 0,8 y 1,6 mm (1/32 - 1/16 pulg) para prevenir agrietamientos. Los métodos de corte térmico o mecanizado son ideales para asegurar precisión (American Welding Society, 1996).
- (2) Embonamiento de las uniones:** Un buen embonamiento garantiza la calidad y resistencia de la soldadura. Es crucial que las uniones estén bien alineadas y la abertura de la raíz sea uniforme, especialmente cuando se utilizan procesos mecanizados o automáticos (American Welding Society, 1996).
- (3) Respaldo de Soldadura:** Se utiliza para sostener el metal fundido durante la soldadura, evitando que se derrame antes de solidificarse. Los métodos de respaldo incluyen tiras de respaldo, soldaduras de respaldo, barras de cobre y fundentes presionados. El respaldo puede ser temporal o permanente, dependiendo del diseño y el tipo de unión (American Welding Society, 1996).
- (4) Fijación de las piezas:** Las fijaciones aseguran que las piezas estén alineadas durante la soldadura y previenen deformaciones. Las fijaciones pueden ser temporales (como soldaduras de puntos) o permanentes, y se emplean junto con guías, rodillos motorizados y manipuladores para facilitar el proceso (American Welding Society, 1996).
- (5) Inclinación del trabajo:** Afecta la forma de la franja de soldadura, tal como se aprecia en la Figura 14. Para piezas delgadas, se prefiere soldar cuesta abajo, mientras que, para materiales más gruesos, se puede inclinar el trabajo para mejorar la penetración

y la calidad de la soldadura. La inclinación lateral también puede influir en el perfil de la soldadura (American Welding Society, 1996).

**Figura 14.**

*Impacto de la inclinación de la pieza en la configuración del cordón de soldadura.*



Nota.: American Welding Society, 1996

#### **k) Métodos para iniciar el arco de soldadura**

El inicio del arco en soldadura depende del tiempo requerido para la configuración y el proceso de soldado, así como por la cuantía de piezas y la precisión requerida. Existen seis métodos principales: (1) con bola de lana de acero, colocando la bola bajo el electrodo y aplicando fundente; (2) con alambre afilado, recortando el electrodo en forma de cincel y tocando la pieza antes de aplicar fundente; (3) por fricción, donde el electrodo contacta la pieza, se aplica fundente y se mueve el carro para evitar que se fusione; (4) con fundente derretido, introduciendo el electrodo en el charco de fundente existente y aplicando corriente; (5) mediante retracción del alambre, haciendo contacto inicial con la pieza y luego retrayendo el electrodo con corriente aplicada; y (6) por alta frecuencia, utilizando un generador para crear una chispa entre el electrodo y la pieza a 1,6 mm de distancia, iniciando el arco sin intervención manual (American Welding Society, 1996).

## I) Posición del electrodo

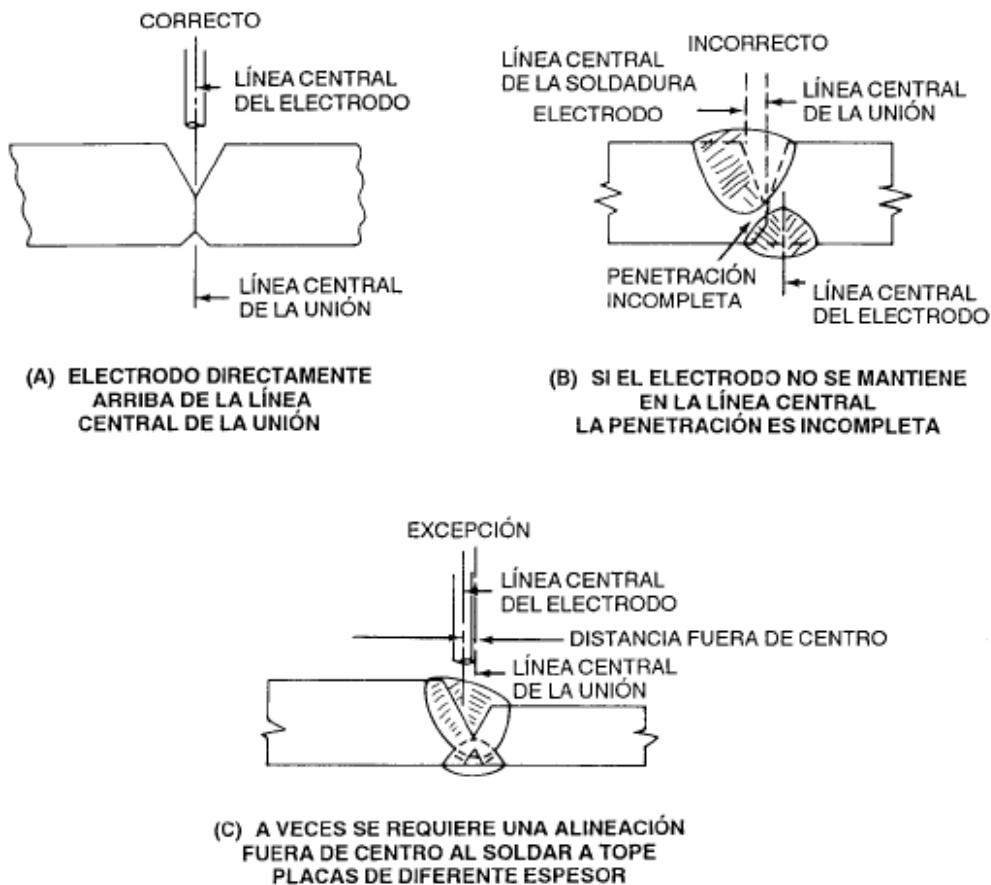
La posición correcta del electrodo en soldadura por arco sumergido es clave para obtener resultados de calidad y depende de varios factores:

- (1) Alineación del electrodo:** Para uniones a tope entre placas del mismo grosor, el electrodo debe ubicarse en la línea central de la unión (Figura 15A). Una alineación inapropiada puede generar defectos como falta de penetración tal como muestra la Figura 15B. En el caso de uniones a tope con espesores desiguales, el electrodo debe posicionarse sobre la sección más gruesa para fundirla al mismo ritmo que la sección más delgada, tal como se ilustra en la Figura 15C (American Welding Society, 1996).
- (2) Ángulo de trabajo:** Este ángulo se refiere a la inclinación lateral del electrodo en un plano perpendicular a la unión. Su ajuste adecuado afecta la distribución del calor y la forma del cordón de soldadura (American Welding Society, 1996).
- (3) Ángulo de desplazamiento:** Determina si el electrodo apunta hacia adelante, en dirección al desplazamiento, formando un ángulo agudo con la soldadura terminada, o hacia atrás, generando un ángulo obtuso. La inclinación hacia adelante produce resultados similares a soldaduras cuesta abajo, mientras que hacia atrás imita el efecto de soldar cuesta arriba (American Welding Society, 1996).

Aunque la inclinación del electrodo hacia adelante o atrás tiene menos impacto en la forma de la soldadura que la posición de las piezas, una correcta configuración asegura un proceso eficiente y resultados de alta calidad.

Figura 15.

Impacto de la posición del electrodo en relación con el surco de soldadura.



Nota: American Welding Society, 1996

### m) Soldaduras circunferenciales

Las soldaduras circunferenciales presentan desafíos diferentes a las soldaduras planas debido al flujo del metal y fundente fundidos, que tienden a desplazarse fuera del arco. Para evitar derrames y deformaciones, la soldadura debe solidificarse al pasar por las posiciones de las doce y las seis en un reloj imaginario (American Welding Society, 1996).

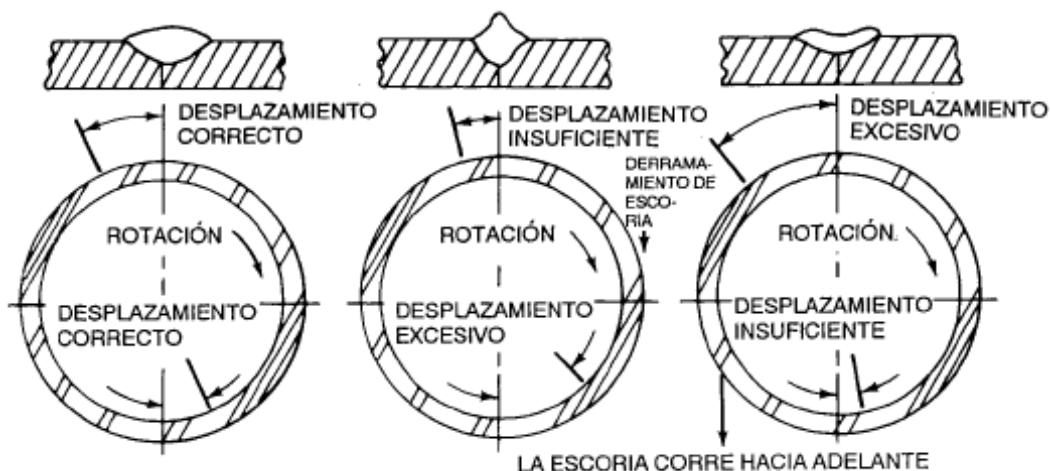
La Figura 16 muestra cómo la ubicación del electrodo influye el perfil de la franja de soldadura. Un ángulo de desplazamiento insuficiente en soldaduras exteriores o demasiado en interiores produce franjas estrechas y convexas, con penetración profunda y riesgo de socavamiento. Por el contrario, un desplazamiento excesivo en exteriores o

insuficiente en interiores genera franjas cóncavas y poco profundas (American Welding Society, 1996).

El fundente granular puede derramarse en piezas de pequeño diámetro, dejando el arco expuesto y disminuyendo la calidad de la soldadura. Para evitarlo, se recomienda usar boquillas que distribuyan el fundente alrededor del arco y aditamentos como cerdas resistentes al calor para contenerlo. Además, un charco fundido excesivamente grande puede derramarse si no se solidifica rápidamente. La franja depende del volumen de metal depositado, el cual está influenciado por velocidad de desplazamiento y el amperaje. Amperajes bajos y velocidades altas ayudan a reducir el tamaño de la franja (American Welding Society, 1996).

**Figura 16.**

*Influencia de la posición del electrodo en la forma de la franja de soldadura durante el desplazamiento circunferencial.*



Nota: American Welding Society, 1996

#### n) Calidad de la soldadura

SAW consigue generar uniones de calidad alta con menos defectos que otros procesos, gracias a la excelente protección del metal de soldadura proporcionada por la capa de escoria fundida. No obstante, pueden surgir problemas como falta de fusión, porosidad, inclusiones de escoria y grietas debido a diversas variables.

**(1) Porosidad:** Generalmente no es un problema en el metal de soldadura limpio, puede aparecer superficialmente o debajo de la superficie, afectando la calidad de la unión. Entre las causas comunes se incluyen contaminantes en la junta, como pintura o residuos de aceites, y contaminación del electrodo, ya sea por óxido o aceites. Además, una cobertura insuficiente o impurezas en el flux, especialmente si se recicla sin un filtrado adecuado, pueden contribuir al problema. Otras causas incluyen escoria atrapada en la base de la junta, segregación de componentes en el metal de soldadura, parámetros de soldadura incorrectos, como alto voltaje o velocidades excesivas, y residuos de soldaduras previas. La humedad o el uso excesivo de flux también pueden generar porosidad, al igual que el fenómeno de desviación del arco (*arc blow*), que puede desviar la trayectoria del arco y comprometer la soldadura. Identificar y controlar estas variables es esencial para minimizar este defecto y garantizar la calidad del cordón de soldadura (American Welding Society, 1996).

**(2) Inclusiones de escoria:** Son sustancias sólidas que quedan atrapadas en la soldadura, como óxido o escoria. Pueden ocurrir en las raíces de la junta, entre pases previos o cerca de caras de ranura (American Welding Society, 1996). Factores de riesgo como:

- Orientaciones descendentes que permiten que el flux se adelante al baño de soldadura.
- Bordes convexos de cordones previos.
- Cortes o defectos en los bordes de la junta.
- Uso de flux de alta viscosidad o superficies previas contaminadas.
- Altas velocidades de soldadura que enfrián rápidamente el metal fundido.

**(3) Falta de fusión:** Se produce cuando no hay una unión completa entre el cordón y el metal base o entre cordones sucesivos (American Welding Society, 1996).

Las causas comunes incluyen:

- Preparación o procedimiento de junta inadecuados.

- Residuos de escoria u óxidos.
- Inestabilidad del arco.
- Velocidades de avance altas.
- Insuficiente aporte de calor.
- Desplazamiento o posicionamiento incorrecto del cabezal de soldadura.

**(4) Grietas:** Las grietas son los defectos más críticos debido al riesgo de fallo catastrófico.

Estas se clasifican en grietas en el metal de soldadura, la zona afectada por calor (ZAC) o el metal base (American Welding Society, 1996), se tienen los siguientes tipos:

- **Grietas en caliente:** Son defectos que se producen durante la solidificación del metal de soldadura o el alivio de tensiones y están relacionadas con diversos factores. Entre ellos se encuentran las altas relaciones profundidad/ancho en soldaduras de alta penetración, que generan tensiones internas significativas; la concavidad excesiva en soldaduras de filete, que debilita la estructura del cordón; y el insuficiente relleno en los extremos del cordón, que deja áreas vulnerables a la formación de grietas. Además, la contaminación química, como la presencia de azufre o compuestos hidrocarbonados, también puede contribuir a este tipo de defecto, afectando la calidad y resistencia de la soldadura (American Welding Society, 1996).
- **Grietas en frío:** Asociadas a fenómenos como fisuración inducida por hidrógeno o corrosión bajo tensión, principalmente en el metal base o la ZAC. Reducir defectos en la soldadura por arco sumergido requiere un control preciso de los parámetros, limpieza adecuada y preparación previa (American Welding Society, 1996).

#### **2.1.3. Mecanización y automatización en soldadura**

Desde sus inicios, la soldadura ha sido un proceso estrechamente vinculado a las habilidades del soldador, esta conexión es especialmente relevante, ya que la clasificación de los métodos de aplicación se fundamenta en el nivel de control humano involucrado en

las actividades relacionadas con la soldadura. Según la AWS, estos métodos se dividen en categorías principales como manual, semiautomático, mecanizado, automático, robotizado y con control adaptativo (Noruk et al., 2018). La distinción entre ellos está en el nivel de intervención humana requerido durante el proceso. Los detalles de los distintos procesos se narran a continuación:

#### **2.1.3.1. Proceso manual**

En este proceso, el soldador tiene control total sobre cada aspecto del procedimiento, incluyendo la velocidad de avance, regulación de los parámetros y la posición del electrodo. Este método se caracteriza por requerir habilidades manuales avanzadas, ofrecer alta flexibilidad para adaptarse a diferentes configuraciones y posiciones, y presentar una calidad de soldadura que depende directamente de la experiencia del operador. Sin embargo, su velocidad es baja y está limitada por la capacidad del soldador. Un ejemplo típico de este proceso es la soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) (Noruk et al., 2018).

#### **2.1.3.2. Proceso semiautomático**

En este proceso, el soldador controla manualmente el soplete o la pistola, mientras que el material de aporte y ciertos parámetros del proceso están automatizados. Este método es más eficiente que la soldadura manual, requiere habilidades intermedias y proporciona una mayor consistencia en la calidad del trabajo. Además, permite alcanzar mayores velocidades de producción, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones de industria. Un ejemplo representativo es la soldadura GMAW-FCAW, que utiliza alimentación automática de alambre (Noruk et al., 2018).

#### **2.1.3.3. Proceso mecanizado**

Automatiza el movimiento del electrodo o soplete, mientras el operador se hace responsable de la configuración de los parámetros y de la supervisión del proceso. Este

método ofrece una mayor repetibilidad y productividad, aunque requiere equipos mecánicos especializados y está limitado a aplicaciones específicas donde el movimiento pueda mecanizarse. Un ejemplo destacado es la soldadura por arco sumergido (SAW) utilizando un carro mecánico (Noruk et al., 2018).

#### **2.1.3.4. Proceso automático**

Este proceso está completamente automatizado, incluyendo el control de parámetros, movimiento del soplete y la alimentación del material de aporte, sin necesidad de intervención humana durante el proceso. Este método ofrece alta productividad y precisión, siendo perfecto para la fabricación en masa de piezas repetitivas. Sin embargo, requiere una inversión considerable en equipos específicos. Un ejemplo común es la soldadura por resistencia eléctrica utilizada en líneas de producción (Noruk et al., 2018).

#### **2.1.3.5. Proceso robotizado**

En este proceso se utiliza robots programables que ejecutan todas las funciones con alta precisión y eficiencia. Este método es ideal para soldar configuraciones tridimensionales complejas y resulta excelente para producciones a gran escala, aunque requiere una alta inversión inicial. Su adaptabilidad a diversas tareas mediante programación lo hace versátil. Un ejemplo común es la soldadura robotizada MIG empleada en la industria automotriz (Noruk et al., 2018).

#### **2.1.3.6. Soldadura por control adaptativo**

Es un proceso avanzado en el que el equipo ajusta automáticamente los parámetros en tiempo real, basándose en sensores que monitorizan las condiciones del material y la calidad del cordón de soldadura. Sus características principales incluyen: (1) inteligencia, ya que los sensores detectan cambios en la pieza, como variaciones en el grosor o posición, y ajustan los parámetros automáticamente; (2) precisión, proporcionando resultados consistentes y de alta calidad, especialmente en aplicaciones

críticas; (3) eficiencia, al reducir el desperdicio de material y tiempo por ajustes manuales; y (4) aplicaciones en diferentes industrias como médica, automotriz y aeroespacial, donde es fundamental la calidad. Un ejemplo representativo es la soldadura láser o TIG adaptativa con control en tiempo real de la penetración (Noruk et al., 2018).

Una comparación general de los métodos de aplicación de soldadura se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6.**  
*Grado de participación del soldador en la realización de las operaciones de soldadura*

| Criterio                   | Manual | Semiautomático | Mecanizado | Automático | Robotizado | Control Adaptativo     |
|----------------------------|--------|----------------|------------|------------|------------|------------------------|
| <b>Intervención Humana</b> | Alta   | Media          | Baja       | Mínima     | Nula       | Nula (con supervisión) |
| <b>Flexibilidad</b>        | Alta   | Media          | Media      | Baja       | Alta       | Alta                   |
| <b>Productividad</b>       | Baja   | Media          | Alta       | Muy alta   | Muy alta   | Muy alta               |
| <b>Precisión</b>           | Media  | Media          | Alta       | Alta       | Muy alta   | Extremadamente alta    |
| <b>Costo Inicial</b>       | Bajo   | Medio          | Alto       | Muy alto   | Muy alto   | Muy alto               |
| <b>Tecnología Avanzada</b> | Baja   | Media          | Media      | Alta       | Alta       | Avanzada               |

Nota.: Noruk et al., 2018

#### 2.1.4. Normas, códigos, especificaciones y clasificaciones de soldadura

Constituyen componentes fundamentales en el campo de la soldadura ya que establecen y regulan lineamientos para las actividades comerciales, científicas e industriales. Existen diversos servicios, productos, áreas, productos y sistemas regulados por dichas normas, cuya estructura, alcance y aplicación pueden ser muy variados. Los documentos que guían las actividades en el sector de la soldadura tienen como finalidad el aseguramiento de la producción de bienes soldados que sean confiables y seguros, además de resguardar a los operarios de soldadura de riesgos que puedan afectar su salud. Todos los involucrados en la fabricación de productos soldados, incluyendo diseñadores, fabricantes, proveedores, personal de montaje e inspectores, deben estar familiarizados al menos con las partes de las normas que son relevantes para sus actividades (American Welding Society, 2020).

- (1) **Normas:** Son documentos técnicos que establecen directrices generales y recomendaciones para la selección de materiales, control de calidad en soldadura y la ejecución de procesos. Su objetivo es proporcionar lineamientos que aseguren la calidad y seguridad en los trabajos de soldadura (American Welding Society, 2020). Se caracterizan principalmente por no ser siempre son obligatorias, salvo que sean exigidas por contratos o regulaciones locales; son elaboradas por organizaciones nacionales e internacionales. Por ejemplo, se tiene el ISO 3834 que hace referencia a los requisitos de calidad para soldadura por fusión de materiales metálicos. Las organizaciones que desarrollan normas pueden ser la Organización Internacional de Normalización (ISO - *International Organization for Standardization*), Instituto Nacional Estadounidense de Normas (ANSI – *American National Standards Institute*), entre otras (American Welding Society, 2020).
- (2) **Códigos:** Son documentos con requisitos técnicos obligatorios, especialmente cuando se incorporan en regulaciones legales o contratos, y regulan aspectos detallados sobre el diseño, construcción, inspección y mantenimiento de estructuras soldadas. Sus características principales incluyen: proveer reglas obligatorias para la ejecución de soldadura en proyectos específicos, ser aplicables en industrias como petróleo y gas, construcción, y generación de energía, y un ejemplo destacado es la ASME Sección IX, el cual regula los procedimientos y la calificación de soldadores. Los principales códigos internacionales de soldadura son esenciales para regular los procedimientos, habilidades y requisitos de calidad en diversos sectores. Entre ellos se encuentra el ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), con su Sección IX del Código de Calderas y Recipientes a Presión, que regula la calificación de procedimientos y habilidades en soldadura y soldadura fuerte. La ISO que incluye al ISO 3834, la cual define criterios de calidad para la soldadura por fusión de metales, además de normar los procesos de soldadura y certificación de los soldadores. La AWS (*American Welding Society*) presenta la norma D1.1 para estructuras de acero soldadas, que incluye reglas específicas para inspección y métodos de soldadura. Las

Normas Europeas (EN), como la EN 1090, se enfocan en la construcción de estructuras fabricadas en acero y aluminio, mientras que en la norma EN ISO 9606 regula la certificación de soldadores. Finalmente, el API (*American Petroleum Institute*), con su API 1104, regula la soldadura de tuberías y sistemas en la industria del petróleo y gas (America Welding Society, 2020).

- (3) **Especificaciones:** Son documentos que definen requisitos técnicos detallados para materiales, equipos o procesos específicos, con el objetivo de garantizar que los insumos y métodos empleados cumplan con los requisitos establecidos para aplicaciones particulares. Sus características principales incluyen detalles sobre composición química, propiedades mecánicas y condiciones de uso, y son fundamentales para seleccionar consumibles de soldadura y materiales base. Un ejemplo es la AWS A5.XX, que establece las especificaciones para consumibles de soldadura como electrodos y alambres. Existen diferentes tipos de especificaciones, como las de materiales, que describen las propiedades químicas y mecánicas de los metales base o de aporte, y las de procedimientos, que detallan los métodos para ejecutar soldaduras bajo condiciones controladas (American Welding Society, 2020).
- (4) **Clasificaciones:** Son sistemas que agrupan materiales, consumibles y procesos de soldadura según sus propiedades, características y aplicaciones, facilitando la selección y uso de materiales adecuados para proyectos específicos. Sus características principales incluyen la organización de materiales y procesos según criterios técnicos comunes, y son utilizadas en códigos y normas para simplificar la calificación de procedimientos y habilidades. Un ejemplo es la clasificación de Números P y F en la ASME Sección IX, donde los Números P agrupan materiales base con propiedades similares, mientras que los Números F clasifican materiales de aporte según su composición química y comportamiento técnico. Otros ejemplos comunes de clasificaciones incluyen la AWS A5.XX, que clasifica consumibles como electrodos y varillas de soldadura, y la ISO 9606, que clasifica a los soldadores según habilidades y procesos (American Welding Society, 2020).

Las diferencias según las necesidades de producción, la complejidad del trabajo y los recursos disponibles en normatividad, códigos, especificaciones y clasificaciones de resumen en la Tabla 7.

**Tabla 7.**

Diferencias entre conceptos de normas, códigos, especificaciones y clasificaciones de soldadura

| Concepto              | Propósito   | Nivel de Detalle | Ejemplo                   |
|-----------------------|---|------------------|---------------------------|
| <b>Norma</b>          | Direcciones generales para asegurar calidad y seguridad en soldadura. | General          | ISO 3834                  |
| <b>Código</b>         | Reglas obligatorias aplicables en contratos o regulaciones legales.   | Detallado        | ASME Sección IX, AWS D1.1 |
| <b>Especificación</b> | Requisitos detallados para materiales y procesos específicos.         | Muy detallado    | AWS A5.XX                 |
| <b>Clasificación</b>  | Agrupación de materiales y procesos según propiedades y aplicaciones. | Organizado       | Números P y F en ASME IX  |

#### 2.1.5. ASME Sección IX- Calificación de procedimientos de soldadura

Establece las bases para la calificación de procedimientos y habilidades en soldadura y soldadura fuerte. Este código, parte del “Código de Calderas y Recipientes a Presión de ASME”, es reconocido a nivel internacional y aplica en varias industrias de producción de energía, procesos químicos y construcciones industriales. Su objetivo principal es asegurar que las uniones soldadas satisfagan las especificaciones exigidas en seguridad, calidad y funcionalidad especificados para cada aplicación (American Society of Mechanical Engineers, 2021).

La sección IX es usada de forma obligatoria para los fabricantes y contratistas que trabajan bajo los estándares del ASME, y también sirve como referencia para otros códigos, como el ASME B31 que es un código de tubería de presión.

**(1) Propósito y alcance:** El principal objetivo de la Sección IX es establecer las bases para: (a) la calificación de procedimientos de soldadura (WPS) y soldadura fuerte (BPS); (b) la certificación de habilidades de soldadores y operadores de soldadura y

soldadura fuerte; y (c) la evaluación de las propiedades mecánicas y estructurales de las uniones soldadas. Esto se logra mediante la documentación y verificación de variables esenciales y no esenciales, así como pruebas destructivas y no destructivas que aseguren que los materiales y procesos cumplen con los estándares requeridos. Mientras que el alcance va desde calderas y recipientes a presión; tuberías industriales; componentes nucleares hasta construcciones especiales sujetas a condiciones críticas.

**(2) Estructura de la Sección IX:** La sección está dividida en dos partes. La primera parte QW de requisitos para soldadura y la segunda parte QB de requisitos para soldadura fuerte. Cada una de estas partes está dividida en artículos fundamentales (American Society of Mechanical Engineers, 2021).

#### **2.1.5.1. Parte QW soldadura**

Se divide en los siguientes artículos:

##### **Artículo I. Requerimientos generales de soldadura**

###### ***Propósito***

Los procedimientos de soldadura (WPS) y soldadura fuerte deben garantizar que las uniones resultantes posean las propiedades requeridas para su aplicación final. Esto incluye aspectos cruciales como la resistencia mecánica, la integridad estructural y la capacidad de soportar condiciones extremas, tales como presión, temperatura y corrosión.

###### ***Variables críticas***

- **Variables esenciales:** Son factores que afectan de forma directa la seguridad de la soldadura y la calidad, dentro de ellas se tiene al material base, a la posición de soldadura y al espesor de las piezas.
- **Variables no esenciales:** Factores que no tienen un impacto significativo en la calidad de la soldadura, pero que deben ser documentados adecuadamente para fines de control y trazabilidad.

- Variables suplementarias: Requeridas en aplicaciones donde se exige una alta tenacidad de muesca, como en estructuras que estarán expuestas a bajas temperaturas.

### ***Responsabilidades***

Cada fabricante o contratista tiene la obligación de:

- Preparar las especificaciones de procedimiento (WPS/BPS).
- Realizar pruebas para calificar tanto los procedimientos de soldadura como al personal involucrado.
- Mantener registros actualizados y verificables de todas las calificaciones obtenidas.

### ***Artículo II. Calificaciones de procedimientos de soldar***

El Registro de Calificación del Procedimiento (PQR) documenta resultados de las ensayos realizados para comprobar que un procedimiento satisface las especificaciones establecidos.

#### ***Proceso de calificación***

- Preparación de muestras: Se fabrican probetas que representan las condiciones reales del procedimiento.
- Pruebas requeridas: (a) Ensayo de tensión para determinar la resistencia que tiene el material soldado; (b) Ensayo de doblado, verifica la ductilidad de la soldadura; y (c) tenacidad de muesca que es aplicable en situaciones donde se requiere alta resistencia al impacto.
- Documentación: El PQR debe incluir todos los parámetros utilizados, resultados de pruebas y observaciones.

### **Artículo III. Calificaciones de habilidad para soldar**

#### ***Propósito***

Evaluá la destreza del soldador u operador para realizar uniones uniformes y libres de defectos.

#### ***Ensayos comunes***

Entre los ensayos se tienen:

- Ensayos mecánicos: Tensión y doblado para asegurar la resistencia y ductilidad.
- Inspecciones visuales y radiográficas: Verifican defectos internos y externos.
- Calificación periódica: Los soldadores deben renovar su certificación para garantizar que sus habilidades se mantienen.

### **Artículo IV. Datos de soldadura**

#### ***Clasificaciones de materiales***

- Números P: Agrupan materiales base con propiedades similares.
- Números F: Clasifican los materiales de aporte según su composición y comportamiento en soldadura.

#### ***Tablas clave***

- QW-451: Espesores calificados según el procedimiento.
- QW-461: Posiciones y orientaciones de soldadura.
- QW-462: Configuraciones y dimensiones de probetas de prueba.

#### **2.1.5.2. Parte QB soldadura fuerte**

La sección QB del código, dedicada a la soldadura fuerte, se organiza en cuatro artículos principales. El Artículo XI aborda los requisitos generales para este tipo de soldadura, proporcionando las bases técnicas y normativas. El Artículo XII se centraliza en las calificaciones del procedimiento de soldadura fuerte, definiendo criterios para su validación. Por su parte, el Artículo XIII establece las calificaciones de habilidad necesarias

para los operadores, garantizando la competencia en la ejecución de estos procesos. Finalmente, el Artículo XIV recopila y organiza los datos técnicos relacionados con la soldadura fuerte, facilitando su consulta y aplicación práctica (American Society of Mechanical Engineers, 2021).

## 2.1.6. Vehículos

Los vehículos son medios de transporte que pueden variar ampliamente en términos de diseño, uso y propulsión. Su clasificación y los componentes varían según su tipo y propósito específico, pero todos comparten la función común de transportar personas o bienes de un lugar a otro.

### 2.1.6.1. Vehículos sobre carretera (*on the road*)

Los vehículos sobre carretera, también conocidos como vehículos terrestres o vehículos de carretera, son aquellos diseñados para desplazarse principalmente sobre superficies pavimentadas como carreteras, calles y autopistas. La Tabla 8 muestra la clasificación de este tipo de vehículos.

**Tabla 8.**  
*Clasificación de vehículos sobre carretera*

| <b>Tipo de vehículo</b>  | <b>Descripción</b>   |
|--------------------------|--|
| <b>Automóviles</b>       | Vehículos de cuatro ruedas utilizados para el transporte personal y familiar   |
| <b>Motocicletas</b>      | Vehículos de dos ruedas utilizados tanto para transporte personal como recreativo.                                       |
| <b>Camiones</b>          | Vehículos diseñados para el transporte de mercancías. Incluyen desde camionetas pequeñas hasta camiones de carga pesada. |
| <b>Furgonetas y vans</b> | Vehículos de tamaño intermedio utilizados para el transporte de mercancías o pasajeros.                                  |
| <b>Autobuses</b>         | Vehículos de gran capacidad diseñados para el transporte de pasajeros en rutas urbanas, suburbanas o interurbanas.       |

### 2.1.6.2. Vehículos fuera de carretera (*off the road* - OTR)

Los vehículos fuera de carretera, también conocidos como OTR del término en inglés de *Off-The-Road*, son aquellos diseñados para operar en terrenos no pavimentados, difíciles o extremos, donde los vehículos convencionales no pueden circular. Estos vehículos se emplean en diversos sectores y labores, como la construcción, silvicultura, minería, agricultura y recreación al aire libre. La Tabla 9 presenta la clasificación de vehículos fuera de carretera.

**Tabla 9.**

Clasificación de vehículos fuera carretera

| <b>Tipo de vehículo</b>               | <b>Descripción</b>   |
|---------------------------------------|--|
| <b>Maquinaria de construcción</b>     | Excavadoras, bulldozers, cargadores frontales, retroexcavadoras. |
| <b>Vehículos mineros</b>              | Camiones volquetes, perforadoras, palas mecánicas.               |
| <b>Maquinaria agrícola y forestal</b> | Tractores, cosechadoras, cargadores de madera.                   |
| <b>Maquinaria militar</b>             | Vehículos blindados y vehículos tácticos                         |

Entre los vehículos fuera de carretera están los camiones mineros, a continuación, se detalla información sobre los mismos:

**(1) Camiones mineros:** Son vehículos OTR especialmente diseñados para operar en las duras condiciones de la minería. Su principal función es transportar grandes volúmenes de material excavado, como mineral, roca y tierra, desde el sitio de extracción hasta las áreas de procesamiento o disposición. Estos camiones se destacan por su gran tamaño, capacidad de carga, robustez y durabilidad, entre estos camiones se tiene al 797F Caterpillar.

**(2) Camión minero 797F Caterpillar:** El Caterpillar 797F es uno de los camiones de minería más grandes y avanzados del mundo. Diseñado para operar en las condiciones extremas de la minería a tajo abierto, el 797F se destaca por su capacidad de hasta 363 toneladas métricas (400 ton. EE.UU.), Tiene una longitud de más de 15 metros, 9 metros de ancho y una altura de 7 metros con un peso de 600 toneladas,

solo los neumáticos pesan 5 toneladas cada uno y está equipado con seis conjuntos de aros de varias piezas, cada conjunto de aros consta de suficiente acero para producir dos automóviles pequeños, suficiente caucho para 600 neumáticos de vehículos de pasajeros y están presurizados a más de 690 kPa (CAT, 2024). La Figura 17 presenta el camión 797F Caterpillar.

**Figura 17.**

Comparación de tamaños de Caterpillar 797F



Nota: CAT, 2024

### 2.1.7. Aros

Los aros son fundamentales para el funcionamiento de los vehículos, ya que, junto con los componentes del sistema de suspensión y las llantas soportan las condiciones adversas del terreno. No solo se requieren para soportar el peso total del vehículo en combinación con los neumáticos, sino también para resistir las fuerzas generadas durante la aceleración, frenado y giros.

#### 2.1.7.1. Clasificación según medida de diámetro

Los aros de vehículos se clasifican según su diámetro, lo que es crucial tanto para los vehículos de carretera como para los vehículos fuera de carretera. A continuación, se presentan las medidas comunes para cada tipo de vehículo.

**(1) Tamaño de aros de vehículos de carretera – *On the road*:** La medida del diámetro del aro en este tipo de vehículos va desde 12 a 24 pulgadas. La Tabla 10 presenta los siguientes tamaños de aros.

**Tabla 10.**

*Tamaño de aros de vehículos de carretera*

| Tamaño de aro                                 | Uso común  | Ejemplo de vehículos  | Ventajas  |
|---|--|---|---|
| <b>Aros pequeños<br/>(13 a 15 pulgadas)</b>   | Vehículos compactos y subcompactos.  | Hatchbacks, sedanes pequeños, y algunos modelos de vehículos eléctricos pequeños. | Mejoran la eficiencia del combustible y proporcionan una conducción más cómoda en entornos urbanos.   |
| <b>Aros medianos<br/>(16 a 18 pulgadas)</b>   | Sedanes medianos, vehículos compactos, y vehículos deportivos ligeros.           | Sedanes familiares, crossovers, y algunos vehículos de lujo.                      | Ofrecen un equilibrio entre comodidad y rendimiento, proporcionando una mejor tracción y manejo.  |
| <b>Aros Grandes<br/>(19 a 22 pulgadas)</b>    | Vehículos de tamaño completo, camiones ligeros, y vehículos de alto rendimiento. | Vehículos de lujo, camionetas, y algunos coches deportivos de alta gama.          | Mejoran el manejo y la estabilidad a altas velocidades, y tienen una apariencia más agresiva y deportiva.   |
| <b>Aros extra grandes (23 pulgadas o más)</b> | Vehículos de lujo y personalizaciones de alto rendimiento                        | vehículos y camionetas de lujo altamente personalizadas.                          | Proporcionan una estética llamativa y mejoran el manejo en condiciones específicas, aunque pueden sacrificar algo de comodidad en la conducción diaria. |

**(2) Tamaño de aros de vehículos fuera de carretera – *Off the road (OTR)*:** La medida del diámetro del aro en este tipo de vehículos va desde 20 a 63 pulgadas. La Tabla 11 presenta los siguientes tamaños de aros.

**Tabla 11.**

*Tamaño de aros de vehículos fuera carretera*

| <b>Tamaño de aro</b>                          | <b>Uso común</b>   | <b>Ejemplo de vehículos</b>   | <b>Ventajas</b>   |
|---|--|---|---|
| <b>Aros pequeños (20 a 25 pulgadas)</b>       | Equipos de construcción ligera, como retroexcavadoras y pequeños tractores.                | Equipos de construcción y agrícolas ligeros   | Diseñados para soportar condiciones de terreno moderadamente difíciles, proporcionan un equilibrio entre durabilidad y maniobrabilidad. |
| <b>Aros medianos (26 a 35 pulgadas)</b>       | Maquinaria de construcción y minería de tamaño medio, como cargadores y camiones volquete. | Cargadores frontales, camiones articulados y otros equipos de construcción y minería de tamaño medio. | Ofrecen mayor resistencia y durabilidad para soportar condiciones de trabajo más extremas y cargas más pesadas.                         |
| <b>Aros grandes (36 a 49 pulgadas)</b>        | Equipos pesados de minería y construcción, como grandes excavadoras y camiones de acarreo. | Excavadoras grandes, camiones de acarreo y otros equipos de minería de gran tamaño.                   | Proporcionan la capacidad de soportar cargas extremadamente pesadas y operar en los entornos más duros.                                 |
| <b>Aros extra grandes (50 pulgadas o más)</b> | Equipos de minería ultra pesados y maquinaria de construcción.                             | Gigantescos camiones mineros y maquinaria de extracción masiva.                                       | Diseñados para las condiciones más extremas, ofreciendo la máxima durabilidad y capacidad de carga.                                     |

#### 2.1.7.2. Clasificación según instalación y acoplamiento al vehículo

Los aros de vehículos se pueden clasificar según su método de instalación y acoplamiento al vehículo. Las dos principales categorías en esta clasificación son los aros artilleros y los aros con disco o plato. A continuación, se describen estas dos categorías y sus características.

**(1) Aros artilleros:** Los aros artilleros tienen un diseño distintivo que incluye múltiples radios que conectan el borde del aro al buje central, similar a las ruedas de artillería de los antiguos cañones. Se acoplan directamente al vehículo mediante pernos que pasan a través de los radios y se fijan al buje (Jantsa, 2022). En la Figura 18 se presenta el aro artillero.

**Figura 18.**

Aro 22.5 x 8.25 Artillero



Nota: Jantsa, 2022

**(2) Aros con disco o plato:** Los aros con disco o plato tienen un diseño donde un disco sólido o perforado se encuentra entre el borde del aro y el buje central. Se acoplan al vehículo mediante pernos que pasan a través del disco central y se fijan al buje (Jantsa, 2022). La Figura 19 muestra un aro con disco y plato.

**Figura 19.**

Aro con disco o plato



Nota: Jantsa, 2022

#### 2.1.8. Aros para vehículos fuera de carretera

Los aros para vehículos fuera de carretera son componentes cruciales diseñados para soportar las condiciones más exigentes y adversas en terrenos no pavimentados, como minas, sitios de construcción y zonas agrícolas; estos aros deben ofrecer una

durabilidad extrema, capacidad de carga y resistencia a impactos (RIMEX, 2017). Un ejemplo de aro fuera de carretera se aprecia en la Figura 20.

**Figura 20.**

Aro de vehículo fuera de carretera de 63x44" de diámetro



Nota: RIMEX, 2017

#### 2.1.8.1. Partes de aros de vehículo fuera de carretera

Los aros de vehículos fuera de carretera (OTR) están conformados por las siguientes componentes y secciones:

**a) Aro base (rim base):**

Es el contorno del aro que cumple la función estructural de soporte para el neumático.

**b) Sección acanalada delantera (Gutter section):**

Es la sección situada hacia la parte exterior del vehículo pose una ranura en la base del aro en la que encajan piezas como, por ejemplo, un anillo de bloqueo de resorte o una pestaña de resorte desmontable y otra ranura donde se aloja el o-ring.

**c) Sección trasera (back section):**

Es la sección situada hacia la parte interior del vehículo pose un asiento donde se sitúa una de las pestañas o *flanges*.

**d) Sección central (center section):**

Es la sección situada a la mitad del aro base.

**e) Disco (Disc):**

Es la parte del aro base que acopla al vehículo.

**f) Pestaña (Flange):**

Es el componente del aro que proporciona soporte lateral al neumático.

**g) Aro cuchillo banda (bead seat band)**

Es el componente del aro que proporciona soporte radial al neumático.

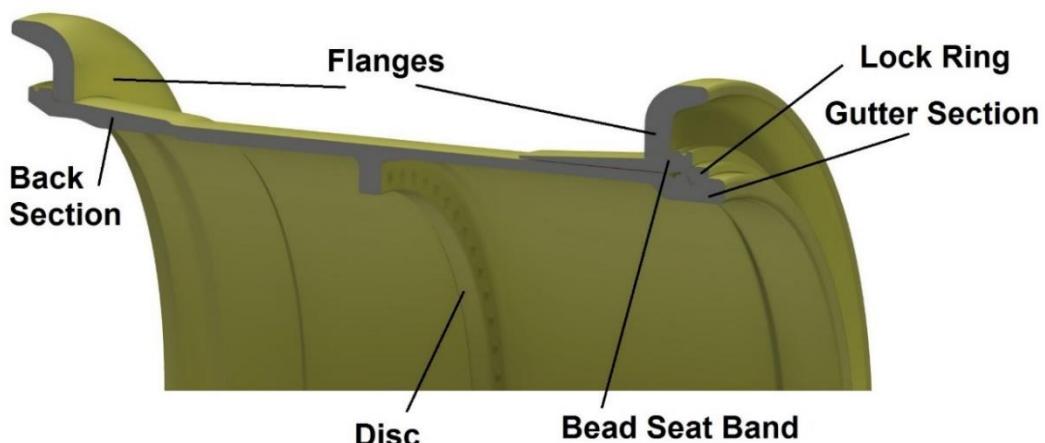
**h) Anillo seguro (lock ring):**

Componte que ejerce la función de bloqueo para los demás componentes desmontables situados en la sección delantera.

La sección transversal de un aro de vehículo fuera de carretera con sus partes se puede visualizar en la Figura 21.

**Figura 21.**

Partes de un aro de vehículo fuera de carretera de 63" de diámetro



### 2.1.8.2. Otros elementos de los aros

**a) Pocket**

Alojamiento que esta soldado tanto en el aro base como en el aro cuchillo.

**b) Llave (Driver-Key)**

Componente que bloquea la rodadura y ejerce un bloqueo entre el aro y sus demás componentes

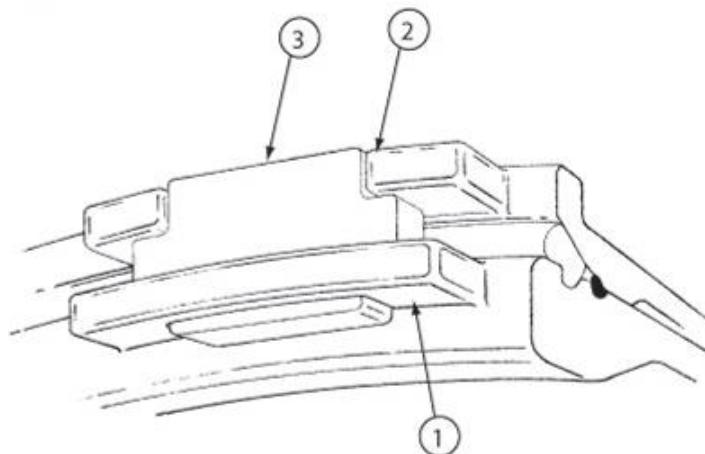
**c) Hoyo de válvula**

Ranura u orificio en el aro que contiene la válvula para el inflado del neumático.

En la Figura 22 se muestra el conjunto de pockets exteriores con driver de aros de 5 piezas para vehículos fuera de carretera (Titan Mining Services, 2022).

**Figura 22.**

Elementos de bloqueo de un aro de un vehículo fuera de carretera



1. Pocket (Soldado en la sección delantera del aro base).
2. Pocket (Soldado al aro cuchillo).
3. Llave

Nota: Titan Mining Services, 2022

#### **2.1.8.3. Medidas de instalación de los aros**

Las medidas de instalación de los aros son los siguientes:

**a) Diámetro del aro (Rim diameter)**

El diámetro del aro, donde se asienta el borde interior del talón del neumático, y normalmente se expresa en pulgadas.

**b) Ancho del aro (Rim width)**

El ancho dentro de las pestañas del aro y normalmente se expresa en pulgadas

c) **Diámetro de disposición de agujeros (Pitch circle diameter)**

El diámetro del círculo alrededor del cual se disponen los espárragos.

d) **Diámetro de piloto (Pilot diameter)**

Es el orificio en el centro del disco del aro.

e) **Diámetro de agujero y cantidad (Bolt hole)**

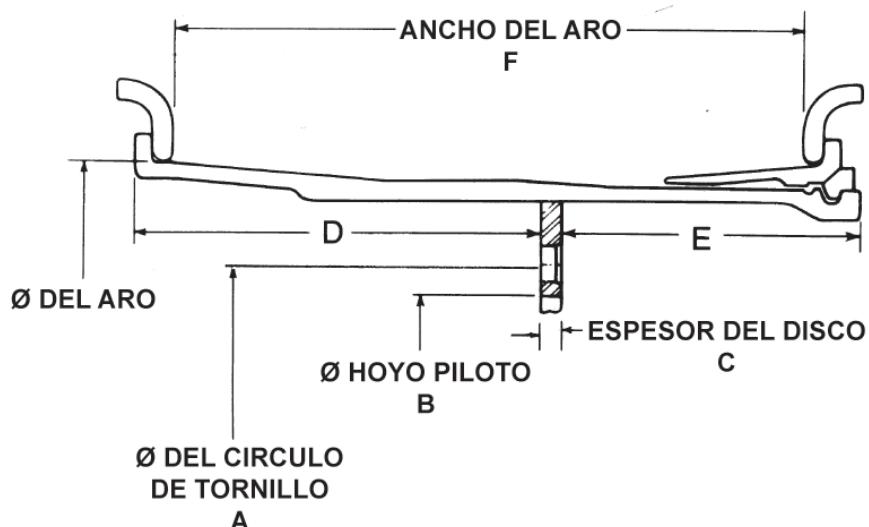
Los orificios mediante los cuales los espárragos sujetan el aro al cubo.

f) **Off set**

La distancia entre la superficie de asiento del aro/cubo y la línea central vertical del aro/neumático. Las medidas de instalación de los aros son mostradas en la Figura 23.

**Figura 23.**

Medida de instalación de los aros – elementos de bloqueo



Nota:.. *Titan Mining Services, 2022*

### 2.1.9. Aros de múltiples piezas

Los aros de los vehículos fuera de carretera (OTR), pueden estar compuestos entre uno a varias piezas denominados aros-OTR de múltiples piezas. Esta clasificación permite ajustar mejor el aro a las necesidades específicas del vehículo y la aplicación, facilitando el montaje y desmontaje, así como la reparación y el mantenimiento.

### a) Aros de 1 pieza

Fabricados como una sola unidad sólida. Mayor resistencia estructural debido a la ausencia de juntas. Proceso de producción más sencillo y menos costoso. La imagen de un aro de una pieza se ilustra en la Figura 24.

**Figura 24.**

Aro de 1 pieza de 16x6



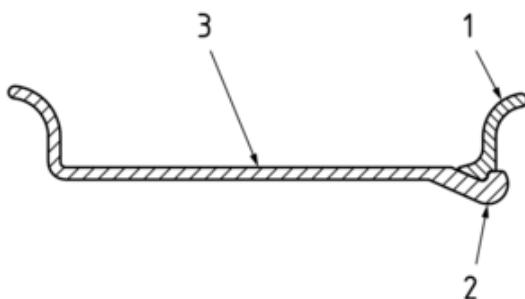
Nota: Jantsa, 2022

### b) Aros de 2 piezas

Compuestos por el aro base (3,2) y un anillo de bloqueo (1). El anillo de bloqueo facilita la instalación del neumático. Puede acomodar variaciones en los tamaños de los neumáticos (ISO 3911, 2021). En la Figura 25 se presenta un aro de dos piezas.

**Figura 25.**

Aro de 2 piezas



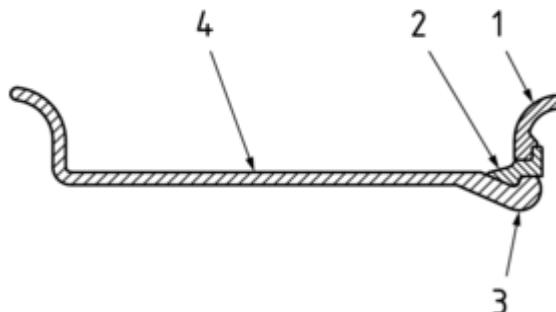
Nota: ISO 3911, 2021

### c) Aros de 3 piezas

Incluyen el aro base (3,4), un anillo de bloqueo (2) y una pestaña desmontable (1). Las piezas desmontables facilitan las reparaciones y el reemplazo. Mejor acoplamiento y seguridad del neumático. En la Figura 26 se presenta un aro de tres piezas.

**Figura 26.**

Aro de 3 piezas



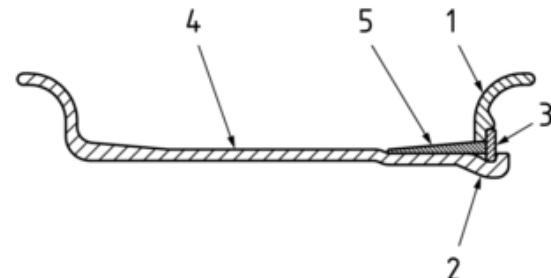
Nota: ISO 3911, 2021

### d) Aros de 4 piezas

Constan del aro base (2,4), un anillo de bloqueo (3), una pestaña (1) y un segmento de refuerzo adicional (5). Poseen mayor soporte estructural para cargas pesadas. Cada pieza puede ser reemplazada independientemente. Se usan en maquinaria de construcción y minería pesada. En la Figura 27 se presenta un aro de cuatro piezas.

**Figura 27.**

Aro de 4 piezas



Nota: ISO 3911, 2021

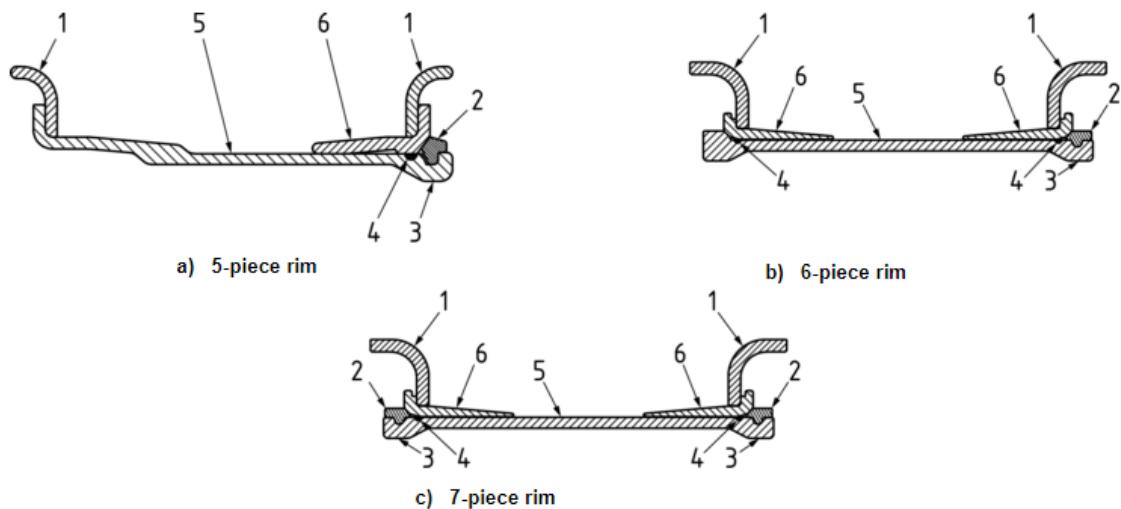
### e) Aros de 5 o más piezas

Compuestos por el aro base (5), anillo de bloqueo (2), dos pestañas (1) y una banda de asentamiento (6), para seis piezas posee una banda de asentamiento adicional (6) y

para siete piezas un anillo de bloqueo (2) adicional más, Ideal para las condiciones más extremas y cargas más pesadas. Permite el reemplazo individual de las piezas desgastadas. Se usan en equipos ultra pesados de minería y construcción. En la Figura 28 se presenta aros de 5, 6 y 7 piezas.

**Figura 28.**

Aro de: (a) 5; (b) 6 y (c) 7 piezas



Nota: ISO 3911, 2021

### 2.1.10. Especificación del aro

Las medidas de los neumáticos y la medida del aro recomendado para cada neumático están establecidas por la Asociación de Neumáticos y Llantas de los EE. UU (*The Tire and Rim Association*). Para los neumáticos se presentan y reconocen con las dimensiones de ancho x diámetro en pulgadas, mientras que para los aros se reconocen con las dimensiones diámetro x ancho, también en pulgadas, en ambos casos los diámetros son coincidentes (Titan Mining Services, 2022). La Figura 29 muestra el ancho de aro y neumático, y la Tabla 12 diferentes valores de especificaciones.

Figura 29.

Especificaciones del aro

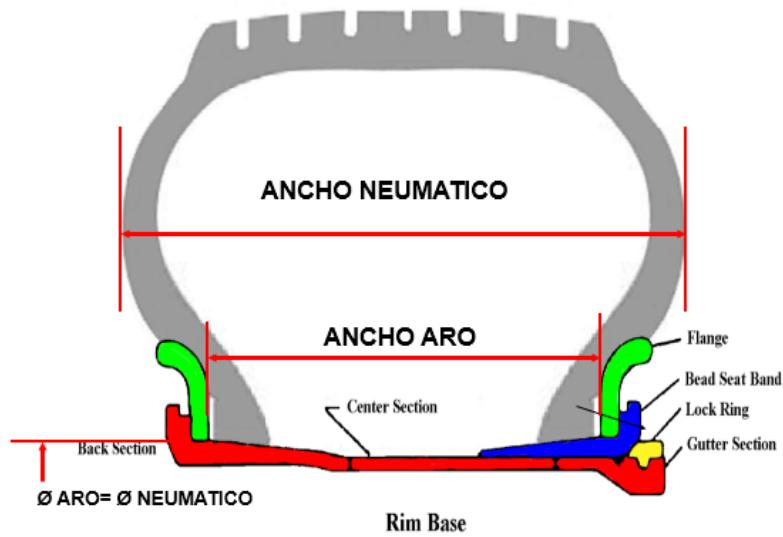


Tabla 12.

Especificaciones de medida de aro y neumático

| MEDIDA DEL NEUMÁTICO          | MEDIDA DE ARO | MEDIDA DEL NEUMÁTICO             | MEDIDA DE ARO |
|-------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|
| 14.00-20                      | 20-10.00      | 33.25-35                         | 35-27.00      |
| 14.00-21, 16.00-21            | 21-10.00      | 37.25-35                         | 35-31.00      |
| 10.00-24, 11.00-24, 12.00-24, | 24-8.00TG     | 33.50-39                         | 39-28.00      |
| 13.00-24, 14.00-24            | 24-8.00TG     | 37.50-39, 40.5/75-39, 40/65-39,  | 39-32.00      |
| 14.00-24                      | 24-10.00TG    | 41.25/70-39                      | 39-32.00      |
| 16.00-24                      | 24-10.00VA    | 45/65-39                         | 39-36.00      |
| 13.00-25, 14.00-25            | 25T-10.00     | 45/65-45                         | 45-36.00      |
| 15.50-25                      | 25-12.00      | 24.00-49                         | 49-17.00      |
| 16.00-25                      | 25-11.25      | 27.00-49                         | 49-19.50      |
| 17.50-25                      | 25-14.00      | 30.00-51                         | 51-22.00      |
| 18.00-25                      | 25-13.00      | 33.00-51                         | 51-24.00      |
| 20.50-25                      | 25-17.00      | 36.00-51                         | 51-26.00      |
| 21.00-25                      | 25-15.00      | 37.50-51                         | 51-32.00      |
| 23.50-25                      | 25-19.50      | 50/65-51                         | 51-40.00      |
| 26.50-25                      | 25-22.00      | 50.00-51                         | 51-40.00      |
| 29.50-25                      | 25-25.00      | 37.00-57                         | 57-27.00      |
| 24.00-29                      | 29-17.00      | 40.00-57, 46/90 R57              | 57-29.00      |
| 26.50-29                      | 25-22.00      | 48/95-57, 44/80 R57, 50/90 R57   | 57-32.00      |
| 30/65-29                      | 29-24.00      | 40/80 R57, 50/80 R57             | 57-34.00      |
| 29.50-29                      | 29-25.00      | 49.5-57, 49.5/85-57, 50/80-57,   | 57-36.00      |
| 33.25-29                      | 29-27.00      | 44/95 R57, 52/80-57              |               |
| 18.00-33                      | 33-13.00      | 53.5/85-57, 55/80-57, 55.5/80-57 | 57-44.00      |
| 27.00-33                      | 33-22.00      | 58/85-57, 53.5/57                | 57-47.00      |
| 33.50-33                      | 33-28.00      | 65/65-57                         | 57-52.00      |
| 35/65-33                      | 33-28.00      | 70/70-57                         | 57-60.00      |
| 37.50-33                      | 33-32.00      | 53/80 R63                        | 63-36.00      |
| 21.00-35                      | 35-15.00      | 55/80 R63                        | 63-41.00      |
| 24.00-35                      | 35-17.00      | 58/80 R63, 59/80 R63             | 63-44.00      |
| 29.50-35                      | 35-25.00      |                                  |               |

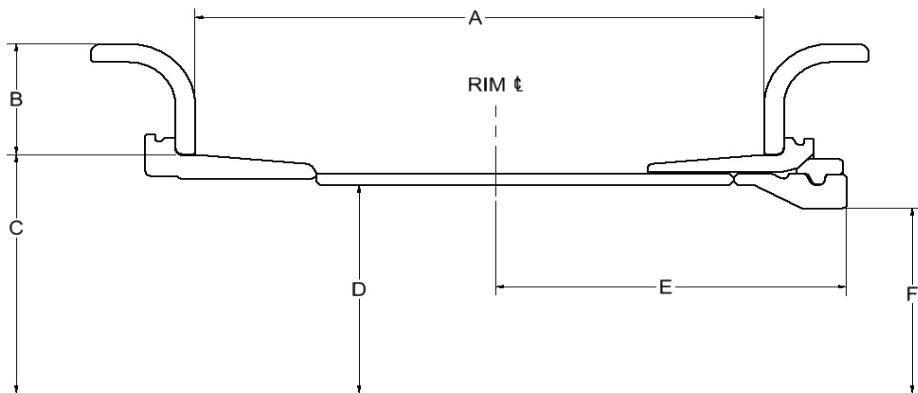
Nota: Titan Mining Services, 2022

## 2.1.11. Aros del camión CAT 797F

Un aro del camión CAT 797F, se fabrica utilizando procesos como rolado, soldadura y mecanizado. El diseño consta de un aro base, un disco de montaje, una pestaña delantera, una pestaña trasera, un anillo de bloqueo y una banda de asiento de talón. El aro base se fabrica por secciones, siendo estas ensambladas junto con el disco de montaje mediante procesos de soldadura. Según las dimensiones del neumático a este camión le corresponde un aro de dimensiones 63" de diámetro por 44" de ancho (Titan Mining Services, 2022). El esquema de un aro CAT 797F se ilustra en la Figura 30.I

**Figura 30.**

Esquema del aro del CAT 797F



Nota: Titan Mining Services, 2022

Todos los componentes de varias piezas están fabricados con acero estructural HSLA. El acero utilizado comúnmente proviene de China y, a menudo, se hace referencia a él con los nombres 16Mn o Q345. El equivalente ASTM de este acero es ASTM A572 Gr. 50. Se describe cualitativamente que el acero tiene buena soldabilidad y resistencia a la corrosión. La Tabla 13 enumera los elementos de aleación primarios en porcentaje en peso de Q345 y el equivalente ASTM. La resistencia a la tracción, % de alargamiento del acero y el límite de fluencia son 450 MPa, 21% (más de 50 mm) y 345 MPa, respectivamente, tal y como establece la norma ASTM A572 G50.

**Tabla 13.**

Composición química del acero HSLA

|                     | <b>C</b><br>(wt%) | <b>Mn</b><br>(wt%) | <b>Si</b><br>(wt%) | <b>P</b><br>(wt%) | <b>S</b><br>(wt%) | <b>Al</b><br>(wt%) | <b>V</b><br>(wt%) | <b>Ti</b><br>(wt%) |
|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| <b>Q345</b>         | ≤ 0,2             | ≤ 1,7              | ≤ 0,5              | ≤ 0,035-<br>≤ 0,3 | ≤ 0,035           | ≤ 0,015            | ≤ 0,15            | ≤ 0,2              |
| <b>A572<br/>G50</b> | ≤ 0,23            | ≤ 1,3              | ≤ 0,4              | ≤ 0,04            | ≤ 0,05            | -                  | 0,01-<br>0,15     | -                  |

El proceso de fabricación del aro del camión minero 797F se muestra en los diagramas de flujo de la Figura 31 y Figura 32.

**Figura 31.**

Diagrama de flujo del proceso de fabricación de los aros 63x44 del CAT 797F

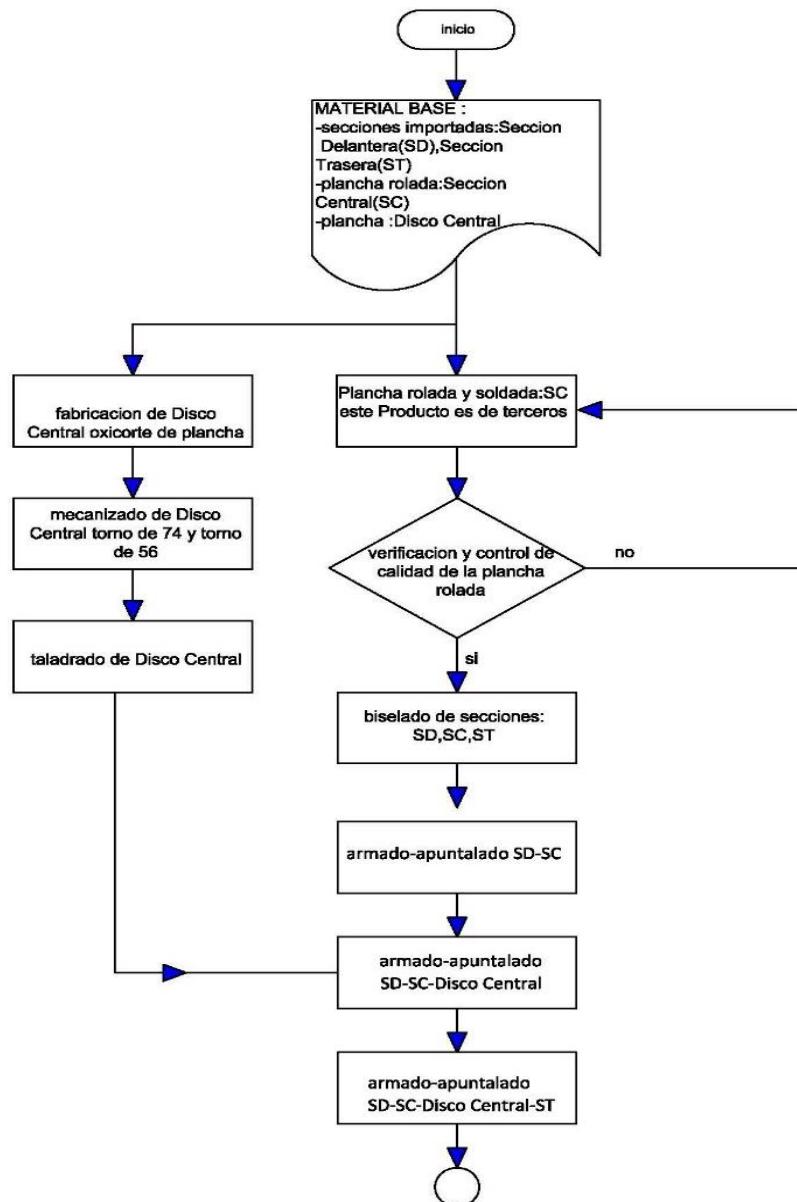
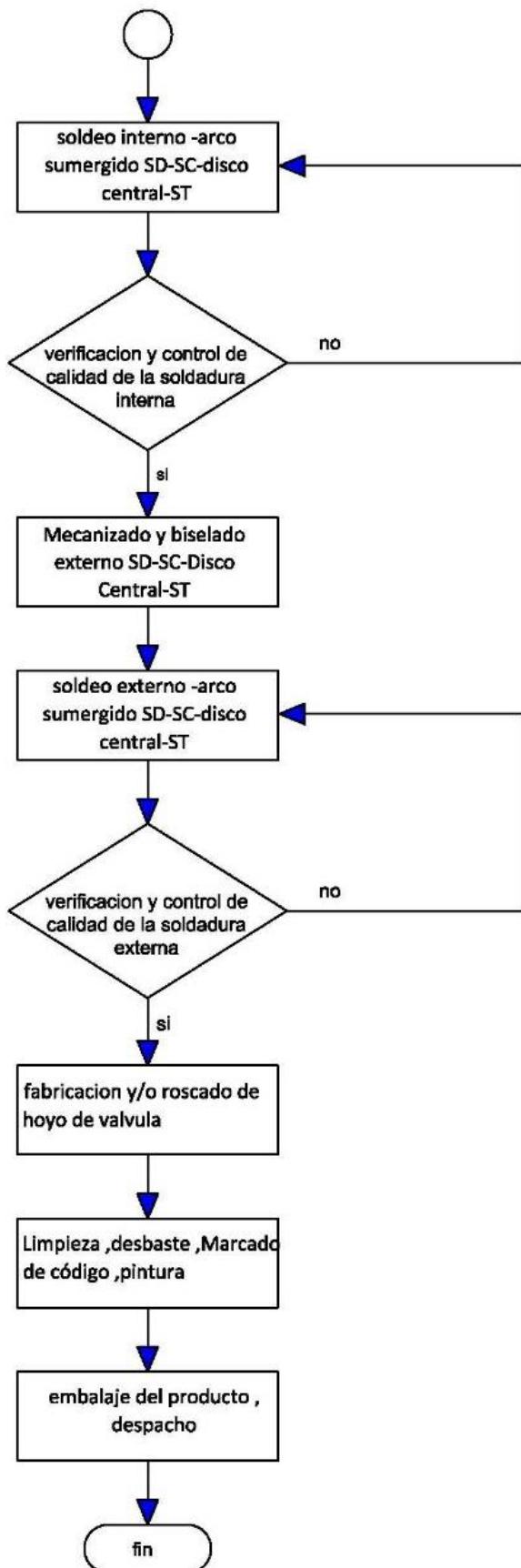


Figura 32.

Continuación del diagrama de flujo del proceso de fabricación de los aros 63x44 del CAT 797F



El proceso de fabricación de los aros 63x44 del camión CAT 797F se muestra a continuación:

### a) Corte

El proceso comienza cortando láminas de acero de alta calidad en placas de distintos espesores. Estas placas sirven como base para los diferentes componentes necesarios para el armado del aro, como secciones traseras, secciones delanteras, bandas centrales y bandas de asiento de talón. Las placas cortadas luego pasan por la máquina de biselado, o “nibbler”, donde se biselan los bordes de las placas. Estos biseles crean una ranura de preparación en V cuando se combinan con los bordes biselados correspondientes (RIMEX, 2023). En la Figura 33 se presenta las láminas de acero cortadas y biseladas.

**Figura 33.**

(a) corte y (b) biselado de planchas de acero para la fabricación del aro del camión 797F



Nota: RIMEX, 2023

### b) Rolado

Luego viene la etapa de rolado, donde las placas cortadas y biseladas se colocan individualmente en la máquina roladora. Mediante un proceso de laminación en frío, estas placas se transforman en sus diámetros especificados (RIMEX, 2023). La Figura 34 muestra el rolado de las planchas de acero.

**Figura 34.**

*Rolado de planchas de acero para la fabricación del aro del camión 797F*



*Nota: RIMEX, 2023*

**c) Apuntalado de secciones**

Después del laminado, las placas roladas se sueldan por puntos en preparación para su montaje. El montaje del aro base es crucial, ya que cualquier discrepancia en los accesorios podría dar como resultado una sección delantera deformada o una sección trasera mal ajustada, lo que en última instancia conduciría a un aro oblongo guiando las secciones entre sí en preparación para la soldadura. El objetivo final es crear aros perfectamente redondos que ofrezcan una vida útil más larga (RIMEX, 2023). La Figura 35 muestra el apuntalado de secciones.

**Figura 35.**

Apuntalado de secciones



Nota.: RIMEX, 2023

#### d) Soldadura

La soldadura es el siguiente paso del proceso. Las planchas roladas se sueldan en sus uniones a tope para formar secciones cilíndricas completas. Los aros bases constan de una banda central con un disco de montaje, una sección delantera y una sección trasera. Estos componentes se sueldan por puntos antes de someterse a la soldadura final. Las uniones a soldar se precalientan para elevar su temperatura y evitar deformidades y grietas por choque térmico (RIMEX, 2023).

Para lograr soldaduras de buena calidad y precisas, se utiliza soldadura por arco sumergido. Esta tecnología de soldadura mecanizada entierra la junta y el arco de soldadura bajo un fundente, llenando la junta con material de soldadura y uniendo el acero de acuerdo a los procedimientos de soldadura estipulados para ese propósito. La soldadura por arco sumergido también oculta la luz del arco eléctrico y evita que los gases de soldadura entren a la atmósfera. Esto permite a los trabajadores monitorear el proceso sin usar capuchas ni respiradores. El resultado son soldaduras de precisión que cumplen o superan los requisitos de la industria (RIMEX, 2023).

Las secciones de los aros están soldadas tanto en sus diámetros interno y externo para así garantizar una penetración total. La penetración total es fundamental para eliminar cualquier debilidad incorporada. Después de soldar, los conjuntos proceden a la estación de esmerilado, donde las soldaduras se pulen y se mezclan al ras con las superficies del acero circundantes (RIMEX, 2023). La Figura 36 muestra la soldadura longitudinal y circunferencial utilizando el proceso de arco sumergido

**Figura 36.**

*Soldadura circunferencial y longitudinal mediante arco sumergido*



Nota: RIMEX, 2023

#### e) Control de calidad

A lo largo de toda la operación de fabricación, se realiza inspecciones ante, durante y después de terminar el proceso para mantener el control de calidad. Estas inspecciones incluyen controles de ultrasonido en fase para detectar grietas o huecos dentro de las uniones soldadas. Además, una prueba que implica la pulverización de partículas magnéticas sobre superficies soldadas ayuda a identificar grietas o huecos al observar su movimiento cuando se aplica un imán (RIMEX, 2023), ver Figura 37.

**Figura 37.**

Inspección de aros



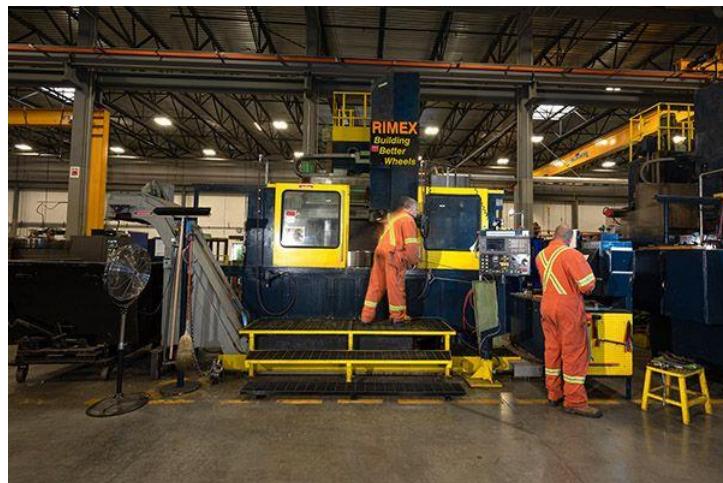
Nota: RIMEX, 2023

#### f) Mecanizado

El mecanizado es un paso crucial después de la soldadura. se utiliza máquinas CNC de última generación para esculpir los conjuntos soldados en secciones formadas. El mecanizado de precisión garantiza secciones completamente redondas con tolerancias extremadamente estrechas en todas las piezas de la rueda. Este nivel de precisión permite un contacto del 100 % entre el neumático y los componentes del aro evitando daños por deslizamiento e indexación. Esto se traduce en una durabilidad superior tanto para los aros como para los neumáticos. Después del mecanizado, se realizan operaciones adicionales, incluida la perforación del patrón de pernos en el disco central y la instalación de válvulas de acuerdo con las especificaciones del cliente (RIMEX, 2023). Ver Figura 38.

**Figura 38.**

Mecanizado con CNC



Nota: RIMEX, 2023

### g) Pintado

Antes de pintar, los aros se someten a granallado y una limpieza exhaustiva para prepararlos para la aplicación de pintura. En esta etapa se acuñan placas de identificación que contienen información de fabricación. Luego, los conjuntos se colocan sobre calzos en un sistema de rieles de carro que conduce a la cabina de pintura. Junto con otras piezas a pintar, viajan a la cabina donde se pintan con aerosol con el sistema de pintura multicomponente según las preferencias de color de los clientes (RIMEX, 2023). La Figura 39 ilustra el procedimiento de limpieza con banda abrasiva seguido del proceso de pintado.

**Figura 39.**

Proceso de limpieza con banda abrasiva y pintado



Nota: RIMEX, 2023

## **h) Pasos finales**

Una vez que se completan la pintura y el secado, se instalan las válvulas según sea necesario y se unen los ensambles aro base - componentes. Una inspección final de control de calidad garantiza que se hayan cumplido todos los estándares antes de que los ensamblajes completos se entreguen a Almacenamiento y Envío para su procesamiento. En esta etapa, se separan en inventario o se cargan en paletas y se envuelven en plástico retráctil para su envío. Los conjuntos paletizados se cargan de forma segura en contenedores o camiones de plataforma plana para su transporte a sus destinos finales (RIMEX, 2023). Los aros ensamblados de 05 piezas terminados se muestran en la Figura 40.

**Figura 40.**

*Aros ensamblados de 05 piezas terminados*



*Nota: RIMEX, 2023*

### **2.1.12. Costos de soldadura**

Para determinar los costos de soldadura se definirá los conceptos básicos que se utilizarán en esta sección. Esto implica definir los términos involucrados de manera clara y precisa, asegurando que exista un entendimiento común sobre las variables, unidades y parámetros que serán empleados.

## (1) Peso del metal depositado (Pmd)

Esta referido a la cantidad de material de soldadura (metal de aporte) fundido y se deposita en una junta durante el proceso de soldadura. Este valor es clave para calcular la eficiencia del proceso de soldadura, los costos y el tiempo necesario para completar un proyecto (INDURA S.A., 2013; Welding Handbook Committee, 2004). Su valor se obtiene mediante la Ecuación 1.

$$Pmd = A_{ST} \times \delta_{Aporte} \times \text{longitud} \quad (1)$$

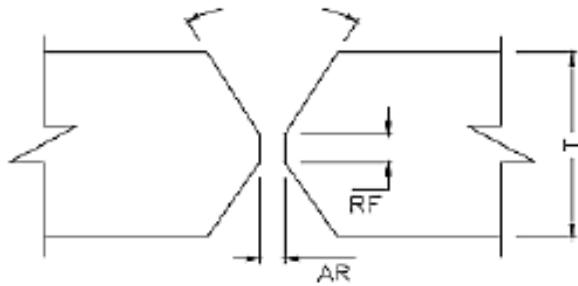
Donde:

$A_{ST}$ : Área de sección transversal ( $m^2$ )

$\delta_{Aporte}$ : Densidad de acero ( $kg/m^3$ )

El área de la sección transversal de una junta en doble V, cuyo diseño se muestra líneas abajo, se determina con la Ecuación 2.

Diseño de una junta doble V:



$$A_{ST} = \frac{1}{2}(T - RF)^2 \tan\left(\frac{A}{2}\right) + AR \times T \quad (2)$$

## (2) Velocidad de deposición (D)

Es un parámetro importante para evaluar la eficiencia y productividad del proceso de soldadura, es una medida de la cantidad de metal de aporte que se funde y se deposita en la junta soldada por unidad de tiempo, se expresa comúnmente en kilogramos por hora

(kg/h) o libras por hora (lb/h) (Welding Handbook Committee, 2004), para su cálculo se emplea la Ecuación 3.

$$D = \frac{(Pmd) \times Va}{e} \quad (3)$$

Donde:

Pmd: Peso del metal depositado (kg/m)

Va: Velocidad de avance (m/h)

e: Eficiencia de deposición del proceso (%)

### **(3) Eficiencia de deposición del proceso de soldadura**

La eficiencia de deposición es un indicador que mide la cantidad de metal de aporte que se funde y realmente se deposita en el cordón de soldadura, en comparación con el total consumido durante el proceso. Se expresa como un porcentaje y refleja las pérdidas asociadas, como salpicaduras, escoria, o extremos no utilizados del electrodo (Welding Handbook Committee, 2004), se calcula con la Ecuación 4.

$$\text{Eficiencia de deposición (\%)} = \frac{\text{Metal consumido útil}}{\text{Metal consumido total}} \times 100 \quad (4)$$

La Tabla 14 se presenta la eficiencia de deposición de los distintos procesos de soldadura.

**Tabla 14.**

*Eficiencia deposición de proceso de soldadura (%)*

| <b>Proceso de soldadura</b> | <b>Eficiencia de deposición (%)</b> |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| SMAW                        | 60 – 70                             |
| MIG/MAG                     | 90                                  |
| FCAW con protección         | 83                                  |
| FCAW sin protección         | 79                                  |
| TIG                         | 95                                  |
| SAW                         | 98                                  |

*Nota: INDURA S.A., 2013*

#### (4) Factor de operación

Se refiere al porcentaje de tiempo durante el cual el arco eléctrico está encendido mientras se está realizando la soldadura, en relación con el tiempo total de trabajo, incluyendo las tareas no relacionadas con la soldadura como preparación de juntas, amolado, cambio de electrodos, etc. (Welding Handbook Committee, 2004). Se determina con la Ecuación 5.

$$\text{Factor de operación (\%)} = \frac{\text{Tiempo con arco encendido}}{\text{Tiempo total de trabajo}} \times 100 \quad (5)$$

La Tabla 15 presenta el factor de operación correspondiente a los diferentes procesos de soldadura.

**Tabla 15.**

Factor de operación de soldadura (%)

| Proceso de soldadura | Factor de operación (%) |
|----------------------|-------------------------|
| SMAW                 | 5 – 30                  |
| MIG/MAG              | 10 – 60                 |
| FCAW                 | 10 – 60                 |
| TIG                  | 5 – 20                  |
| SAW                  | 50 – 100                |

Nota: INDURA S.A., 2013

#### (5) Mano de obra

En los costos de los procesos de soldadura, la mano de obra se refiere a los costos asociados con el trabajo realizado por los soldadores y el personal de apoyo involucrado en la ejecución de la soldadura y será expresado en \$/h (Welding Handbook Committee, 2004).

#### (6) Flujo de gas (F)

Cantidad de gas necesario para protección por unidad de tiempo (Welding Handbook Committee, 2004). La Tabla 16 presenta la cantidad de flujo de gas para distintos procesos de soldadura.

**Tabla 16.**

*Flujo de gas*

| <b>Proceso de soldadura</b> | <b>Flujo de gas (m<sup>3</sup>/h)</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| MIG/MAG                     | 0,8 – 1,2                             |
| FCAW                        | 1,0 – 1,4                             |
| TIG                         | 0,5 – 1,0                             |

*Nota: INDURA S.A., 2013*

#### **(7) Factor de uso del fundente**

Cantidad de fundente efectivamente empleado por kg de alambre depositado (Welding Handbook Committee, 2004). En la Tabla 17 se precisa el porcentaje del factor de uso del fundente para arco sumergido.

**Tabla 17.**

*Factor del uso del fundente*

| <b>Proceso de soldadura</b> | <b>Factor del uso del fundente (%)</b> |
|-----------------------------|--|
| Arco sumergido              | 80 – 100                               |

*Nota: INDURA S.A., 2013*

#### **(8) Costo por metro lineal de soldadura**

Para determinar el costo de la soldadura por metro lineal se emplean las ecuaciones 6, 7, 8, 9 y 10.

$$\text{Costo consumible } (\$/m) = \frac{(Pmd) \times P_c}{e} \quad (6)$$

$$\text{Costo mano obra } (\$/m) = \frac{(Pmd) \times M_O}{D \times f_o} \quad (7)$$

$$\text{Costo gas } (\$/m) = \frac{(Pmd) \times F \times P_g}{D} \quad (8)$$

$$\text{Costo fundente } (\$/m) = (Pmd) \times f_f \times P_f \quad (9)$$

$$\text{Costo energía } (\$/m) = \frac{T_f \times V \times I \times (Pmd) \times n}{1000 \times D \times f_o} \quad (10)$$

Donde:

- P<sub>md</sub> : Peso del metal depositado (kg/m)
- D : Velocidad de deposición (kg/h)
- e : Eficiencia de deposición del proceso (%)
- f<sub>o</sub> : Factor de operación del proceso (%)
- f<sub>f</sub> : Factor de uso del fundente (%)
- n : Factor de potencia (%)
- F : Flujo de gas (m<sup>3</sup>/h)
- MO : Salario del soldador/operador (\$/h)
- P<sub>c</sub> : Precio del consumible (\$/kg)
- T<sub>f</sub> : Tarifa (\$/kw-h)
- P<sub>g</sub> : Precio del gas (\$/kg)
- V : Voltaje (V)
- I : Intensidad de corriente (A)

## 2.2. Marco Conceptual

**Alambre de soldadura:** Forma de material de relleno para soldadura, normalmente envasado en bobinas o carretes, que puede o no conducir corriente eléctrica según el proceso de soldadura en el que se utilice (American Welding Society, 2020).

**Coalescencia:** El crecimiento conjunto o la formación de un solo cuerpo de los materiales que se unen (American Welding Society, 2020).

**Electrodo:** Componente del circuito de soldadura que termina en el arco, la escoria conductora fundida o el metal base (American Welding Society, 2020).

**Electrodo consumible:** Electrodo que proporciona metal de aporte (American Welding Society, 2020).

**Especificación del Procedimiento de Soldadura:** Denominado también WPS por de *Welding Procedure Specification*. Es un documento que proporciona las variables de soldadura requeridas para una aplicación específica, para garantizar la repetibilidad por parte de soldadores y operadores de soldadura debidamente capacitados (Welding Handbook Committee, 2004).

**Fundente:** Sustancia granular que resguarda el arco eléctrico y el charco de soldadura frente a la oxidación. En SAW, también estabiliza el proceso y mejora las propiedades mecánicas del cordón (American Welding Society, 2020).

**Metal depositado:** Metal de aporte añadido durante la soldadura fuerte, blanda o autógena (American Welding Society, 2020).

**Operador de soldadura:** Persona que opera equipo de soldadura con control adaptativo, automático, mecanizado o robótico (American Welding Society, 2020).

**Pasada de soldadura:** Progresión simple de la soldadura a lo largo de una junta, el resultado de una pasada es un cordón o una capa de soldadura (American Welding Society, 2020).

**Registro de Calificación de Procedimiento:** Denominado también como PQS por sus siglas del inglés *Procedure Qualification Record*. Documento donde se establece el conjunto de materiales y procedimientos de manera preliminar esenciales para la correcta realización del WPS (Welding Handbook Committee, 2004).

**Registro de Calificación del Rendimiento del Soldador:** Conocido también como WPQR de los términos en inglés *Welder Performance Qualification Record*. Es un documento escrito que califica la especificación de procedimiento de soldadura,

denominado también WPS por sus siglas en inglés de *Welding Procedure Specification* (Welding Handbook Committee, 2004).

**Soldar:** Pegar y unir sólidamente dos cosas, o dos partes de una misma cosa, normalmente con alguna sustancia igual o semejante a ellas (Diccionario de la lengua española, 2024).

**Soldadura:** Proceso para unir materiales que produce coalescencia calentándolos a la temperatura para soldar, con o sin la aplicación de presión o solo por la aplicación de presión, y con o sin utilizar metal de aporte (American Welding Society, 2020).

## **CAPITULO III**

### **Desarrollo del trabajo de investigación**

Este capítulo presenta la identificación de variables necesarias para las especificaciones del procedimiento de soldadura, la calificación del mismo, la propuesta de implementación del proceso SAW, los equipos requeridos y el análisis de costos para la fabricación de aros OTR de 5 piezas para camiones Caterpillar 797.

#### **3.1. Determinación de las variables esenciales de soldadura**

Este trabajo se centró exclusivamente en las variables esenciales de soldadura, ya que estas influyeron directamente en la calificación o recalificación del procedimiento de soldadura. Por ello, se han analizado únicamente los apartados del código ASME IX que definieron dichas variables para los procesos seleccionados en la fabricación de la pieza de prueba SAW. En particular, se estudiaron los párrafos QW-254 (Anexo 2) del código ASME IX, que abordaron los aspectos clave del proceso de soldadura SAW. Entre las variables esenciales se tienen:

##### **3.1.1. Metal base (QW-403)**

El código ASME IX agrupa los metales base según sus propiedades mecánicas, composición química y soldabilidad, asignándoles así una designación denominada Número P. La agrupación de materiales mediante el Número P simplifica el proceso de calificación de procedimientos y soldadores, ya que permite reducir la cantidad de pruebas requeridas al extender la calificación de un procedimiento o soldador a todos los materiales dentro de un mismo grupo de número P (American Society of Mechanical Engineers, 2021).

Según la tabla QW/QB-422 de ASME Sección IX el material utilizado en este estudio fue acero A36, con número P y grupo de 1, con composición nominal de C-Mn-Si. La Tabla 18 ejemplifica la clasificación del material base.

**Tabla 18.**

QW/QB-422 Números P

| QW/QB-422 NUMERO P Y NUMEROS S FERROSOS<br>Agrupamiento de Metales Base para Calificación |               |        |  |           |             |      |             |                  |      |                     |                                 |  |
|---|---------------|--------|--|-----------|-------------|------|-------------|------------------|------|---------------------|---------------------------------|--|
| Nº Espec  | Tipo o grado  | Nº UNS | Tensión mínima especificada (kib/pulg <sup>2</sup> ) | Soldadura |             |      |             | Soldadura fuerte |      | Composición Nominal | Forma de producto               |  |
|   |               |        |  | NºP       | Nº de grupo | Nº S | Nº de grupo | NºP              | Nº S |                     |                                 |  |
| SA-36   | .....         | K02600 | 58   | 1         | 1           | .... | ....        | 101              | .... | C-Mn-Si             | Placa, barra y perfiles         |  |
| SA-53   | Tipo F        | .....  | 48   | 1         | 1           | .... | ....        | 101              | .... | C                   | Tubo C soldadura en horno       |  |
| SA-53   | Tipo S, Gr. A | K02504 | 48   | 1         | 1           | .... | ....        | 101              | .... | C                   | Tubo C s/c                      |  |
| SA-53   | Tipo E, Gr. A | K02504 | 48   | 1         | 1           | .... | ....        | 101              | .... | C                   | Tubo C soldadura de resistencia |  |
| SA-53   | Tipo E, Gr. B | K03005 | 60   | 1         | 1           | .... | ....        | 101              | .... | C-Mn                | Tubo C soldadura de resistencia |  |
| SA-53   | Tipo S, Gr. B | K03005 | 60   | 1         | 1           | .... | ....        | 101              | .... | C-Mn                | Tubo C s/c                      |  |

Nota: American Society of Mechanical Engineers, 2021

### 3.1.2. Material de aporte (QW-404)

Estos materiales se clasifican según sus propiedades y aplicaciones, ya que estas características, según la normativa, afectan la habilidad de los soldadores y operadores para ejecutar el proceso. Su nomenclatura incluye los Números F y Números A, siendo el primero el más relevante, mientras que el segundo se limita exclusivamente a materiales ferrosos (Silva et al., 2019). Asimismo, la norma ASME Sección IX regula diversas variables esenciales asociadas a los materiales de aporte, como la inclusión o exclusión del consumible (QW-404.14), el método de fabricación del mismo (QW-404.23), los consumibles suplementarios (QW-404.24), los elementos de aleación (QW-404.27) y el espesor del metal depositado (QW-404.30) (American Society of Mechanical Engineers, 2021).

La Tabla 19 ejemplifica la clasificación del material de aporte a emplear en soldadura según QW-432 del código ASME IX.

**Tabla 19.**

*Rango de números F: QW-432*

| QB-432<br>NUMEROS-F<br>Agrupamiento de Metales de Aporte de Soldadura Fuerte para Calificación<br>de Procedimiento y de Habilidad<br>SFA-5.8 |       |  |
|--|-------|--|
| QB   | No. F | Clasificación AWS No.  |
| 432.1  | 101   | BAg-1<br>BAg-1a<br>BAg-8<br>BAg-8a<br>BAg-22<br>BAg-23<br>BVAg-0<br>BVAg-8<br>BVAg-8b<br>BVAg-30 |

*Nota: American Society of Mechanical Engineers, 2021*

### **3.1.3. Temperatura de precalentamiento (QW-406) y tratamiento térmico posterior a (TTPS) soldadura (QW-407)**

Según con los establecido en la norma ASME Sección IX, el apartado QW-406.1 establece las condiciones para el precalentamiento, mientras que QW-407.1 y QW-407.4 especifican las propiedades del tratamiento térmico aplicado después de la soldadura (TTPS).

### **3.1.4. Gas (QW-408), características eléctricas (QW-409) y técnicas de soldadura (QW-410)**

Según el párrafo QW-408.2, cualquier cambio en el tipo de gas utilizado, ya sea puro o mezclado, requiere la recalificación del procedimiento de soldadura. Por su parte, el párrafo QW-408.9 establece que un procedimiento calificado con gas de protección de raíces, o gas de purga, debe emplearse exclusivamente con dicho tipo de gas; asimismo, un procedimiento calificado sin gas de purga permite realizar soldaduras tanto con cómo sin la utilización de gas de protección en la raíz.

En cuanto a las características eléctricas, se utilizó una corriente continua con polaridad inversa (EP), en un rango de 500 a 540 Amperios con 31 – 33 voltios. Con relación a la técnica se tuvo una velocidad de avance de 83 a 92 cm/min, sin oscilación y con pase y electrodo simple.

### **3.2. Calificación el procedimiento de soldadura por arco sumergido y al operador del proceso según la norma internacional ASME sección IX.**

#### **3.2.1. Preparación para la especificación de procedimiento de soldadura (WPS)**

El diseño de la soldadura se ajusta según su aplicación, ya sea estructural o en recipientes a presión. Para procesos regidos por el código ASME Sección IX, se consultaron las tablas relevantes: QW/QB-422 (Números P) de clasificación de materiales base por grupo y especificación; y QW-432 (Números F) de clasificación de materiales de aporte. Se seleccionó el metal base, su espesor y el proceso de soldadura considerando los esfuerzos de tensión, asegurando que el material de aporte tenga una resistencia superior a la del trabajo. En el Anexo 2 se presenta el QW-482 – Especificación del procedimiento de soldadura donde se menciona las variables esenciales y los parámetros de soldadura para la fabricación de aros metálicos mediante el proceso de arco sumergido.

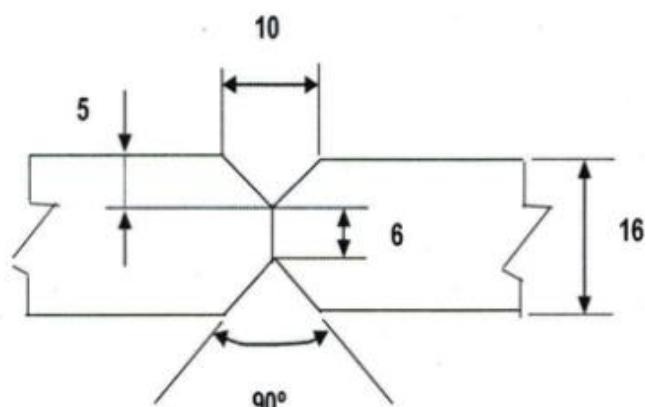
##### **(1) Diseño de la junta de soldeo**

Como diseño de junta se usa una unión biselada a doble tope, este es un tipo de preparación para uniones soldadas que consiste en biselar ambos bordes de las piezas a unir, formando una geometría simétrica en forma de "X". Este diseño se utiliza en soldaduras de gran espesor para garantizar una penetración completa del metal de aporte y una unión de alta resistencia. En la Figura 41 se ilustra el diseño de las juntas empleadas en la fabricación de aros mediante el proceso de arco sumergido.

Los parámetros de soldeo fueron espesor de 16 mm, posición 1G, diámetro de electrodo de 3,25 mm y pases 02.

**Figura 41.**

Diseño de junta doble bisel a tope sin respaldo para la fabricación de aros por SAW



Dimensiones en mm.

## (2) Metal base

Como material base para las extensiones se usa planchas roladas de acero al carbono fabricada según las especificaciones ASTM A36, que es una norma ampliamente utilizada en el sector industrial. Este material es reconocido por sus propiedades mecánicas y su facilidad para ser trabajado, lo que lo convierte en una opción adecuada para diversas aplicaciones estructurales y de manufactura. Las propiedades físicas y composición química del acero A36 se reportan en la Tabla 20.

**Tabla 20.**

Propiedades del acero A36

| Composición química |      |           |      |      |           |      |
|---------------------|------|-----------|------|------|-----------|------|
| Elemento            | C    | Mn        | P    | S    | Si        | Cu   |
| Cantidad            | 0,25 | 0,80-1,20 | 0,04 | 0,05 | 0,15-0,40 | 0,20 |

| Propiedades mecánicas |                           |                    |
|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Prueba                | Resistencia a la Tracción | Límite de Fluencia |
| Valor (Mpa)           | 400-550                   | 250                |

Nota: (COMASA, 2024)

### **(3) Material de aporte**

Se usa la combinación de fundente y alambre de soldadura F7A4-EM12K utilizada en el proceso de soldadura por arco sumergido. Esta designación se halla en la norma AWS A5.17 que regula consumibles para soldar aceros al carbono. El nombre describe tanto el fundente como el alambre y las características del depósito de soldadura resultante.

#### ***Fundente: F7A4***

Donde:

F: Enseña que se utiliza un fundente diseñado para soldadura por arco sumergido.

7: Representa que el depósito de soldadura tiene resistencia mínima a la tracción de 70 ksi (482 MPa).

A: Denota que es conveniente para soldadura en posición horizontal (2G) y plana (1G).

4: Indica que el depósito de soldadura tiene buena resistencia al impacto a temperaturas de hasta -40°C.

#### ***Alambre: EM12K***

Donde:

E: Significa "Electrodo" (alambre de soldadura).

M: Indica que es un alambre de acero al carbono de composición media.

12: Es un código que señala la composición química del alambre, con aproximadamente 0.1-0.2% de carbono y 1% de manganeso.

K: Indica un contenido bajo de silicio, que mejora la limpieza de la soldadura al reducir defectos como inclusiones o porosidad.

Un ejemplo de fundente y alambre F7A4-EM12K de la marca ESAB se ilustra en la Figura 42.

**Figura 42.**

Combinación F7A4-EM12K, marca ESAB



Nota: (ESAB, 2024)

### **3.2.2. Elaboración del registro de calificación de procedimiento de soldadura (PQR)**

El PQR valida el WPS mediante el registro detallado de las variables esenciales observadas durante las pruebas. Incluye los datos reales obtenidos, como las variables esenciales y los resultados de las pruebas destructivas, tales como pruebas de tracción y doblado. Para completar el PQR, se redactó inicialmente un WPS preliminar, a partir del cual se soldó un cupón de prueba. Posteriormente, se prepararon los especímenes de ensayo, se realizaron las pruebas requeridas, y luego fueron evaluados los resultados obtenidos. Finalmente, toda esta información fue documentada en el PQR.

Con los resultados e informes de las pruebas mecánicas se elaboró el PQR, cuyo contenido se ilustra en el Anexo 3.

### **3.2.3. Registro de calificación de operadores y soldadores (WQR)**

El WQR documentó las variables esenciales del WPS de referencia y los resultados de los ensayos realizados, lo que permitió certificar a los soldadores u operadores que ejecutaron el procedimiento. Este registro fue emitido por una entidad especializada o por el área de calidad de la empresa, con un período de validez limitado establecido por la normativa.

Toda la información relevante quedó debidamente registrada en el WQR, cuyo formato se presenta en el Anexo 4.

### **3.3. Comparación del costo beneficio de la implementación del proceso SAW con respecto al proceso SMAW en la fabricación de aros de camiones mineros 797F**

Los costos de SAW incluyen todos los gastos asociados a la realización de una unión soldada mediante este método. Esto abarca costos directos, como el material de aporte (alambre y fundente), el consumo eléctrico, la depreciación del equipo de soldadura, los consumibles, y los costos indirectos relacionados con la preparación de piezas, inspecciones, mano de obra y gestión de residuos. También pueden incluir gastos adicionales como el mantenimiento del equipo, almacenamiento de materiales y cumplimiento de normativas de seguridad y calidad. Los costos fueron calculados para el diseño de junta doble bisel mostrada en la Figura 41.

En la Tabla 21 se tiene los parámetros de soldeo para los procesos SAW y SMAW, cuyos datos de eficiencia de deposición, factor de potencia ( $\eta$ ), factor de uso del fundente (ff), factor de operación (fo), velocidad de avance (Va), voltaje (V) e intensidad de corriente (I) fueron obtenidos de la literatura (INDURA S.A., 2013; Welding Handbook Committee, 2004; Weman, 2012a), específicamente, en los tres últimos parámetros para el proceso SAW, los datos fueron adquiridos del Anexo 2. El valor referencial del salario del soldador (MO) fue tomado de las tablas salariales publicados por Cámara de Peruana de la Construcción (CAPECO, 2024). La tarifa de energía (Tf) se basó en la información de Osinergmin (OSINERGMIN, 2022). Los precios del fundente (Pf) y del consumible (Pc) se obtuvieron a través del contacto directo con una empresa local.

**Tabla 21.**

Datos de soldadura para los procesos SAW y SMAW

| Parámetros de soldeo            | Unidad  | Proceso de soldadura |      |
|---------------------------------|---------|----------------------|------|
|                                 |         | SAW                  | SMAW |
| Velocidad de avance (Va)        | m/h     | 54                   | 4,2  |
| Precio del consumible (Pc)      | \$/kg   | 2,00                 | 4,00 |
| Eficiencia de deposición (e)    | %       | 98                   | 65   |
| Factor de uso del fundente (ff) | %       | 90                   | 0    |
| Precio del fundente (Pf)        | \$/kg   | 5,00                 | 0    |
| Salario del soldador (MO)       | \$/h    | 7,50                 | 5,00 |
| Factor de operación (fo)        | %       | 90                   | 20   |
| Tarifa de energía (Tf)          | \$/Kw-h | 0,20                 | 0,20 |
| Voltaje (V)                     | V       | 32                   | 24   |
| Intensidad de corriente (I)     | A       | 500                  | 120  |
| Factor de potencia ( $\eta$ )   | ---     | 0,75                 | 0,75 |

Nota: INDURA S.A., 2013; Welding Handbook Committee, 2004; Weman, 2012a; CAPECO, 2024; OSINERGMIN, 2022.

Con base en el diseño de la Figura 41, se determinaron el área transversal, la velocidad de deposición y el peso del material depositado. Para ello, fueron usados valores de la Tabla 21 en las ecuaciones (1), (2) y (3), los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 22.

**Tabla 22.**

Resultados de área transversal, peso del metal depositado y velocidad de deposición

| Parámetros de soldeo      | Unidad         | Proceso de soldadura |         |
|---------------------------|----------------|----------------------|---------|
|                           |                | SAW                  | SMAW    |
| Área transversal          | m <sup>2</sup> | 0,00005              | 0,00005 |
| Peso del metal depositado | Kg/m           | 0,3925               | 0,3925  |
| Velocidad de deposición   | Kg/h           | 21,627               | 2,5361  |

Utilizando los valores de la Tabla 21 y Tabla 22, fueron calculados los costos por metro lineal de soldadura para junta de doble V. Los cálculos se realizaron tanto para el proceso SAW con alambre EM12K de 3,25 mm como para SMAW usando electrodo E7018 de 3,25 mm.

## CAPITULO IV

### Resultados, contrastación de hipótesis y discusión de resultados

#### 4.1. Comparación técnica del SAW frente a otros procesos de soldadura

En el presente informe, el proceso SAW fue elegido para la manufactura de aros OTR de 5 piezas destinados a camiones Caterpillar 797 debido a sus ventajas técnicas como la eficiencia del arco, el cual es un factor determinante en la elección de un proceso de soldadura, puesto que influye en el efecto del calor sobre la soldadura y la zona afectada por el calor. El proceso SAW presenta una eficiencia del arco de 0,95; superior a otros procesos como SMAW (0,80), GMAW con CO<sub>2</sub> en acero (0,85) y GTAW con argón en acero (0,40) (Singh, 2020). Esta alta eficiencia del arco indica un mejor aprovechamiento del calor generado, que contribuye a una fusión eficiente del material base y del material de aporte, reduciendo con ello, la cantidad de energía desperdiciada.

Entre las ventajas que posee el proceso SAW se encuentran una elevada tasa de deposición, una penetración profunda que reduce la cantidad de material de relleno requerido y una capacidad de mantener un factor de tiempo de arco alto, lo que se traduce en un tiempo efectivo de soldadura prolongado (Weman, 2012a). Estas características hacen que SAW sea altamente eficiente en la fabricación de aros OTR, donde se requiere una producción en serie con altos estándares de eficiencia.

Otro factor crucial en la elección de SAW es su alta eficiencia de deposición, tal como se aprecia en la Tabla 23. Este proceso tiene una eficiencia de deposición del 98%, considerablemente mayor en comparación con otros métodos, como manual de metal por arco (60%) y el proceso MIG/MAG con alambre sólido (95%) (Weman, 2012b). La alta eficiencia de deposición reduce significativamente la pérdida de material de aporte, optimizando el consumo de insumos y reduciendo costos operativos. Al minimizar las

pérdidas por salpicaduras y escoria, se obtiene una soldadura más uniforme y con menor necesidad de retrabajos o correcciones."

**Tabla 23.**

*Eficiencia de aportación*

| Proceso                            | Eficiencia de deposición (%) |
|------------------------------------|------------------------------|
| Soldadura manual de metal por arco | 60                           |
| MIG/MAG, alambre sólido            | 95                           |
| MAG, alambre con núcleo fundente   | 85                           |
| Arco sumergido                     | 98                           |

*Nota: Weman, 2012b*

Además de las ventajas técnicas, SAW es respetuosa con el medio ambiente, ya que el fundente de manta elimina la exposición a arcos eléctricos visibles, reduce las salpicaduras y disminuye la generación de humos (Perez Kedzi, 2019).

Por otro lado, el proceso SAW tiene limitaciones que deben considerarse como la soldadura solo se puede realizar en posiciones plana u horizontal para evitar la pérdida del fundente de cobertura, asimismo, para soldaduras de múltiples pasadas, es necesario retirar la escoria antes de aplicar la siguiente capa (Perez Kedzi, 2019). A pesar de estas restricciones, las ventajas de alta eficiencia y optimización de recursos hacen que el proceso SAW sea la mejor opción para la fabricación de aros OTR de 5 piezas para camiones Caterpillar 797F.

#### **4.2. Aplicación del proceso SAW en la fabricación de aros OTR de 5 piezas para camiones Caterpillar modelo 797F**

El SAW es clave para la fabricación de aros OTR de 5 piezas utilizados en los camiones Caterpillar modelo 797F, conocidos por su capacidad de carga extrema en minería y construcción. Estos aros soportan condiciones operativas severas, con alta carga dinámica y choques térmicos, por lo que deben cumplir estrictos requisitos de rendimiento y durabilidad. La Figura 43 muestra el aro base del CAT 797F terminado.

**Figura 43.**

Aro base CAT 797F terminado



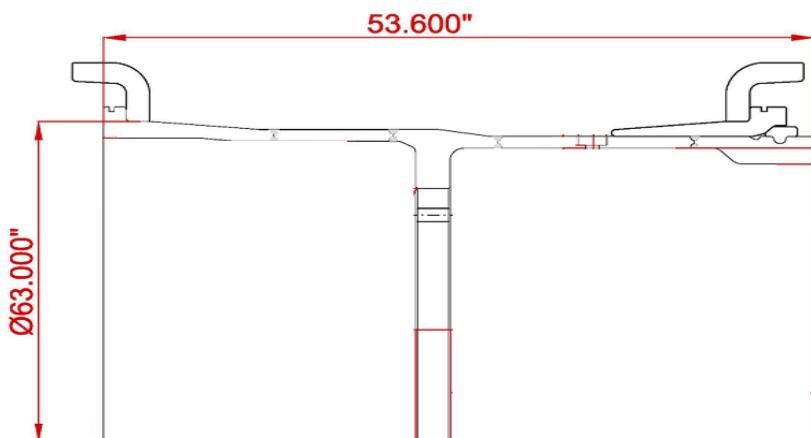
Nota.: *Titan Mining Services, 2022*

### **(1) Fabricación del aro base**

El aro base es un recipiente cilíndrico con dimensiones de diámetro de 63 pulgadas y una altura de 53,6 pulgadas está formado por 05 secciones cilíndricas unidas mediante el proceso SAW. La Figura 44 presenta una representación gráfica en corte lateral del diseño estructural del aro compuesto por cinco piezas. En esta ilustración, se pueden ver los detalles internos y las dimensiones clave que conforman cada sección del aro.

**Figura 44.**

Vista de corte lateral del aro de 05 piezas



Nota.: *Titan Mining Services, 2022*

Las cinco secciones están compuestas por piezas maquinadas, que incluyen la sección delantera (SD), la sección trasera (ST) y el disco central (DC). Estas secciones se ensamblan mediante soldadura con otras dos secciones laminadas de acero A36-A105, que funcionan como extensiones de las secciones delantera (BCD) y trasera (BCT). En el proceso de fabricación, estas piezas se identifican según las denominaciones mostradas en la Figura 45.

**Figura 45.**

Base del aro (a) y secciones: (b) delantera – SD; (c) trasera – ST; (d) extensión de sección delantera – BCD; (e) Extensión de sección trasera – BCT; y (f) Disco central – DC.

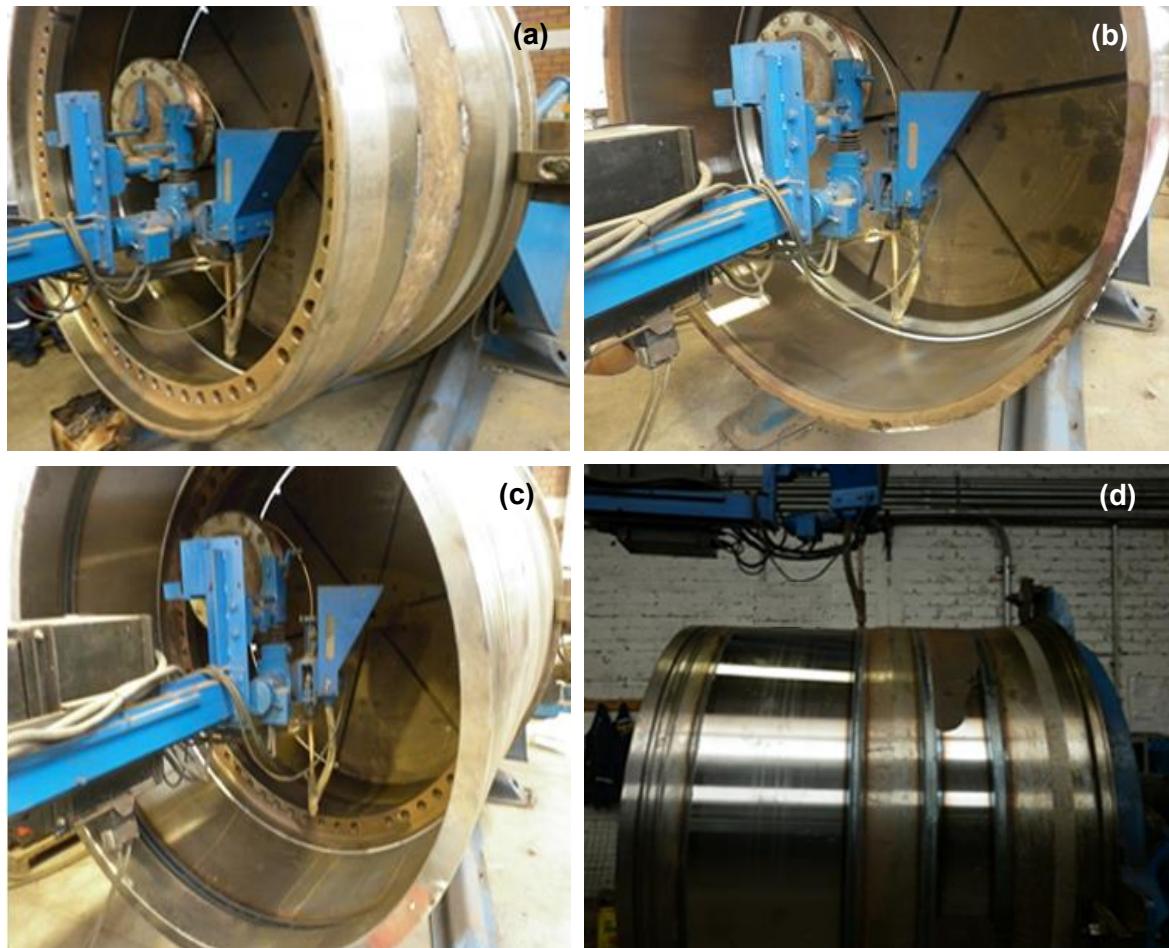


## (2) Secuencia de soldeo de las 05 secciones mediante el proceso SAW

El proceso de soldeo de las cinco secciones que conforman el aro se realiza siguiendo una secuencia lógica y controlada. En primer lugar, como se ilustra en la Figura 46(a), se ejecuta el proceso SAW en el interior de las dos juntas que unen la sección ST, la BCT y el DC, asegurando la integridad estructural inicial. Posteriormente, según la Figura 46(b), se realiza el soldeo interior de la junta que conecta la sección SD con la BCD. Continuando con el procedimiento, la Figura 46(c) detalla el soldeo interior de la junta que une la sección BCD con el DC. Finalmente, la Figura 46(d) ilustra el soldeo exterior de las juntas que abarcan todas las secciones (ST, BCT, DC, BCD y SD), consolidando la estructura completa del aro y garantizando su resistencia y durabilidad.

**Figura 46.**

Proceso SAW en juntas del aro (a) interiores ST, BCT y DC; (b) interior SD con BCD; (c) interior BCD y DC; y (d) exterior ST, BCT, DC, BCD y SD.



#### 4.3. Equipos necesarios para la aplicación del proceso SAW

Los equipos necesarios para la fabricación de aros OTR de 5 piezas para camiones Caterpillar modelo 797 aplicando el proceso SAW son los siguientes:

##### (1) Fuente de energía

Se utiliza una fuente de alimentación de corriente continua (DC), especialmente diseñada para aplicaciones industriales de alta exigencia que demandan gran capacidad y versatilidad. Este equipo es ampliamente empleado en procesos de soldadura por arco sumergido (SAW). Las especificaciones técnicas requeridas son:

- Salida de Corriente: 60 - 600 amperios.
- Ciclo de trabajo: 100% a 500 amperios (excelente para trabajos prolongados sin interrupción).
- Rango de voltaje: Ajustable de 40 a 44 voltios.
- Dimensiones: Aproximadamente 800 x 565 x 790 mm.
- Peso: Alrededor de 163 kg

En la Figura 47 se presenta una fuente de energía de la marca Lincoln, modelo Idealarc DC-600, que cumple las especificaciones técnicas requeridas para el proceso SAW.

**Figura 47.**

Fuente de energía Idealarc® DC-600



Nota: (Lincoln Electric, 2024a)

## (2) Alimentador

Se usa un alimentador que suministre el alambre a una velocidad controlada, asegurando la deposición uniforme de metal de aporte en el charco de soldadura. Además, debe estar integrado con sistemas que manejan el polvo de flujo que protege el arco y mejora las propiedades mecánicas de la soldadura. Las especificaciones técnicas necesarias para el alimentador son:

- Rango de velocidad de alimentación: 25 a 775 pulgadas por minuto (0,6 a 16,5 m/min).
- Rango de diámetro del alambre: Mínimo de 0,045 pulgadas (1,1 mm) y máximo de 7/32 pulgadas (5,6 mm).
- Dimensiones: 324 x 470 x 565 mm
- Peso: 18,6 kg
- Voltaje de entrada: 115 VAC.

Un alimentador de la marca Lincoln, modelo K356-2-NA-5, adecuado para cumplir con las especificaciones técnicas requeridas para el proceso SAW, se observa en la Figura 48.

**Figura 48.**

Alimentador Lincoln K356-2-NA-5



Nota: (Lincoln Electric, 2024b)

### **(3) Manipulador**

Se usa un equipo diseñado para automatizar procesos de soldadura, especialmente en aplicaciones de soldadura por arco sumergido, tales como recipientes a presión, tuberías de gran diámetro. Las especificaciones técnicas del manipulador son:

- Máxima carga al final del brazo: 250 kg
- Rango de movimiento: Altura de columna de 11 pies y longitud de brazo (*boom*) de 11 pies.
- Velocidad del brazo: 175-1750 mm/min
- Velocidad de elevación: 1000 mm/min

Un manipulador de la marca Lincoln, modelo CB-MATIC LM ideal para cumplir con las especificaciones técnicas requeridas para el proceso SAW, se puede ver en la Figura 49.

**Figura 49.**

*Manipulador Lincoln CB-MATIC LM*



Nota: (Lincoln Electric, 2024d)

#### (4) Posicionador

Se emplea un posicionador diseñado para manejar piezas grandes y pesadas en procesos como soldadura, corte por oxicorte, recubrimiento, y metalización. Las especificaciones técnicas requeridas son:

- Capacidad de carga: 3000 kg en cualquier posición
- Velocidad de rotación: Ajustable entre 0,1 y 1,5 rpm
- Torque de rotación: Proporciona un torque de 450 m·kg
- Torque de inclinación: Ofrece un torque de 1300 m·kg

En la Figura 50 se presenta un posicionador de la marca Lincoln, modelo Posimatic PS30 que cumple las especificaciones técnicas requeridas para el proceso SAW.

**Figura 50.**

Posicionador Lincoln Posimatic PS30



Nota: (lincoln Electric, 2024c)

#### 4.4. Registro de calificación del procedimiento de soldadura (PQR)

Las tabla 24 y 25 presentan los resultados de las pruebas de tensión y flexión realizadas en la unión soldada mediante el proceso SAW (Anexo 3), respectivamente. Se empleó como material base acero A36 a A105, con espesor de 15,9 mm y diámetro de 1448 mm. El material de aporte utilizado correspondió a la especificación SFA A5.17, con

clasificación F7A4-EM12K-Ni1, F-No 6, y un diámetro de 3,25 mm. Los ensayos de tensión revelaron una resistencia máxima promedio de 505 MPa, dentro del rango especificado en la Tabla 20 del código, que varía entre 400 y 550 MPa. Esto indica que la soldadura tiene una resistencia mecánica superior al material base, lo que favorece su durabilidad y desempeño estructural.

En la prueba de flexión, que evalúa la ductilidad y resistencia de la soldadura, los resultados fueron aceptables. La ausencia de fisuras y la adecuada flexibilidad sugieren que la unión soldada puede resistir cargas cíclicas de manera eficiente, contribuyendo a una mayor vida útil de la estructura del aro.

**Tabla 24.**

*Resultados de la prueba de tensión*

| <b>Pruebas de tensión</b> |                   |                     |                              |                                |                               |
|---------------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>Especimen No</b>       | <b>Ancho (mm)</b> | <b>Espesor (mm)</b> | <b>Área (mm<sup>2</sup>)</b> | <b>Carga rotura total (KN)</b> | <b>Resistencia máx. (Mpa)</b> |
| TA – 1                    | 19,05             | 9,57                | 182,3                        | 92,0                           | 504                           |
| TA - 2                    | 19,05             | 9,57                | 182,3                        | 92,3                           | 506                           |
| <b>Promedio</b>           | <b>19,05</b>      |                     |                              | <b>92,15</b>                   | <b>505</b>                    |

**Tabla 25.**

*Resultados de los ensayos de dobles*

| <b>Ensayos de dobles guiado</b> |                   |
|---------------------------------|-------------------|
| <b>Tipo y figura No</b>         | <b>Resultados</b> |
| De lado 1                       | Aceptable         |
| De lado 2                       | Aceptable         |
| De lado 3                       | Aceptable         |
| De lado 4                       | Aceptable         |

#### **4.5. Costo beneficio de implementación del proceso de soldadura**

En la Tabla 26 se presenta el análisis de costo-beneficio relacionado a la implementación de los procesos de soldadura para la fabricación de aros OTR de 5 piezas para camiones Caterpillar modelo 797. Este análisis compara los costos de soldadura utilizando los procesos SAW (arco sumergido) y SMAW (electrodo revestido manual).

**Tabla 26.***Comparativa de costos entre los procesos SAW y SMAW*

| Descripción de costos                | SAW (Alambre EM12K de 3.25 mm) | SMAW (Alambre E7018 de 3.25 mm) |
|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Costo consumible (\$/m)              | 2,0025                         | 2,4154                          |
| Costo mano obra (\$/m)               | 0,1512                         | 3,8691                          |
| Costo energía (\$/m)                 | 0,0484                         | 0,3343                          |
| Costo fundente (\$/m)                | 1,7662                         | 0                               |
| <b>Costo por metro lineal (\$/m)</b> | <b>3,9683</b>                  | <b>6,6188</b>                   |

El costo por metro lineal de soldadura se multiplicó por el perímetro del aro (5,03 m) para calcular el costo total por aro, considerando 4 juntas y 2 pasadas por aro, como se detalla en la Tabla 27.

**Tabla 27.***Costos totales por proceso SAW y SMAW*

| Cálculos de costos totales           | SAW           | SMAW          |
|--------------------------------------|---------------|---------------|
| Costo por metro lineal x 5.03 m (\$) | 19,96         | 33,29         |
| <b>Costo por aro (\$)</b>            | <b>160,00</b> | <b>799,00</b> |

Los resultados demuestran una clara ventaja económica del proceso SAW frente al proceso SMAW. El costo por metro lineal del proceso SAW es considerablemente más bajo (\$3.9683/m frente a \$6.6188/m), lo que se traduce en un ahorro significativo al aplicarlo en la fabricación de los aros OTR. Este ahorro se debe principalmente a la mínima intervención de mano de obra en el proceso SAW (\$0.1512/m) en comparación con el SMAW (\$3.8691/m). Además, el proceso SAW presenta una mayor eficiencia en la deposición del metal, lo que incrementa su velocidad de producción y reduce los costos asociados al tiempo operativo.

Por otro lado, aunque el costo del consumible y el uso de fundente aumentan ligeramente el costo del proceso SAW, estos valores se ven ampliamente compensados por su mayor eficiencia energética y la reducción de costos laborales. El costo total por aro

utilizando el proceso SAW es de \$160, lo que representa un ahorro del 80% en comparación con el proceso SMAW, cuyo costo total asciende a \$799.

En términos operativos, el proceso SAW es especialmente ventajoso para proyectos de alta demanda, como la fabricación de aros OTR, debido a su capacidad para depositar mayor cantidad de metal en menor tiempo. Esto, combinado con su bajo costo total, lo convierte en la opción más rentable y eficiente para aplicaciones industriales pesadas.

#### **4.6. Contrastación de hipótesis**

Basado en los resultados obtenidos para cada objetivo planteado en este trabajo, se valida la hipótesis general y las hipótesis específicas.

La contrastación de la hipótesis general se realizó mediante la evaluación de las uniones soldadas obtenidas con el proceso de soldadura por arco sumergido. Los resultados de las pruebas de tensión y flexión (Tablas 24 y 25) confirmaron que la resistencia máxima promedio de 505 MPa se encuentra dentro del rango especificado (400-550 MPa), indicando una mejora en la resistencia estructural y durabilidad. Asimismo, la ausencia de fisuras en la prueba de flexión sugiere una reducción de defectos de fabricación.

**Objetivo específico 1:** Determinar las variables esenciales del procedimiento de soldadura por arco sumergido en la fabricación de aros de camiones mineros 797F.

- Se determinó mediante un análisis detallado de las variables esenciales del procedimiento de soldadura por arco sumergido (SAW) en la fabricación de aros de camiones mineros 797F, utilizando los lineamientos del código ASME Sección IX. Se identificaron seis variables esenciales que influían directamente en la calificación del procedimiento y en los resultados de las uniones soldadas: el metal base, el material de aporte, la temperatura de precalentamiento, el tratamiento térmico posterior, las características eléctricas y las técnicas de soldadura. El análisis del metal base (QW-403)

se centró en el acero A36, clasificado como Número P1, Grupo 1, según la Tabla 18 de QW/QB-422 Números P. Esta clasificación permitió extender la calificación a otros materiales dentro del mismo grupo, simplificando el proceso. Respecto al material de aporte (QW-404), se seleccionó un consumible con número F específico, cumpliendo las normas de calidad y compatibilidad con el material base. La temperatura de precalentamiento (QW-406) y el tratamiento térmico posterior (QW-407) se ajustaron para prevenir defectos como grietas en las uniones soldadas. Además, las características eléctricas (QW-409), como el uso de corriente continua con polaridad inversa, y la velocidad de avance entre 83 y 92 cm/min, se definieron para garantizar una penetración adecuada. Finalmente, las técnicas de soldadura (QW-410) consideraron la ausencia de oscilación y el uso de pase y electrodo simples.

**Objetivo específico 2:** Calificar el procedimiento de soldadura por arco sumergido y al operador del proceso según la norma internacional ASME sección IX.

- La calificación del procedimiento de soldadura por arco sumergido (SAW) y de los operadores conforme a la norma ASME Sección IX se logró mediante la elaboración de la Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) y el Registro de Calificación de Procedimiento de Soldadura (PQR). El diseño de la junta doble bisel a tope sin respaldo, con espesor de 16 mm, garantizó una penetración completa y alta resistencia. Se emplearon planchas de acero al carbono ASTM A36 como metal base, complementadas con material de aporte F7A4-EM12K, seleccionado por su compatibilidad y resistencia. Durante las pruebas de calificación, se registraron las variables esenciales, incluyendo posición 1G, velocidad de avance, tipo de corriente, y parámetros térmicos. Los ensayos destructivos, como pruebas de tracción y doblado, validaron la resistencia y calidad de las uniones. Finalmente, los soldadores fueron calificados con base en los resultados del WQR, documentando su habilidad para replicar el procedimiento con consistencia, cumpliendo los estándares de calidad requeridos.

**Objetivo específico 3:** Comparar el costo beneficio de la implementación del proceso de soldadura por arco sumergido con respecto al proceso de soldadura convencional manual en la fabricación de aros de camiones mineros 797F.

- La comparación del costo-beneficio entre los procesos de soldadura por arco sumergido (SAW) y soldadura manual con electrodo revestido (SMAW) en la fabricación de aros OTR para camiones Caterpillar modelo 797F demuestra una ventaja significativa del proceso SAW. Este análisis consideró costos de consumibles, mano de obra, energía y materiales complementarios, además de la eficiencia de deposición y productividad. El costo por metro lineal de soldadura SAW (\$3.9683/m) es notablemente menor al de SMAW (\$6.6188/m), resultando en un costo total por aro de \$160 para SAW frente a \$799 para SMAW, con un ahorro del 80%. Este beneficio se atribuye a la mayor eficiencia de deposición del SAW (98% frente a 65%) y menores costos laborales (\$0.1512/m frente a \$3.8691/m). Aunque el fundente aumenta ligeramente los costos del SAW, su alta velocidad de deposición (21,627 kg/h frente a 2,5361 kg/h) y eficiencia energética lo hacen ideal para proyectos de alta demanda, consolidándolo como la opción más rentable y eficiente.

## CONCLUSIONES

La implementación del proceso de soldadura por arco sumergido en la fabricación de aros de camiones mineros 797F permitió mejorar las uniones soldadas, asegurando una mayor resistencia mecánica y reducción de defectos. Estos resultados validan la propuesta de SAW como una alternativa eficiente y confiable para optimizar el desempeño estructural en la industria minera.

Se establecieron las variables esenciales del procedimiento SAW para la fabricación de aros de camiones mineros 797F, fue utilizado acero A36 (P-1, grupo 1) como metal base, con material de aporte clasificado según la norma ASME sección IX. Se determinó una temperatura de precalentamiento adecuada y un tratamiento térmico posterior a la soldadura conforme a QW-406 y QW-407. Las características eléctricas incluyeron una corriente de 500 a 540 A y un voltaje de 31-33 V, con una velocidad de avance de 83-92 cm/min, garantizando una fusión homogénea y una unión soldada de alta resistencia.

Se calificó el procedimiento de soldadura por arco sumergido y del operador, conforme a la norma ASME Sección IX, la cual garantizó un proceso seguro y replicable, cumpliendo con los estándares exigidos en la industria minera. Se elaboró la Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) considerando las variables esenciales, como el metal base ASTM A36 y el material de aporte F7A4-EM12K-Ni1. Posteriormente, se llevó a cabo el registro de la calificación del procedimiento de soldadura (PQR) para el WPS elaborado previamente, registrando todos los datos de los ensayos destructivos realizados. Estos ensayos permitieron evaluar la resistencia de las uniones soldadas bajo las condiciones especificadas en el WPS. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, confirmando que el procedimiento de soldadura cumple con los requisitos mecánicos exigidos por la normativa para la fabricación de los aros metálicos.

El análisis económico evidenció que la implementación del proceso SAW representa una disminución considerable en los costos de producción de los aros OTR. El

costo por metro lineal de soldadura con SAW fue de \$3.9683/m, mientras que con SMAW fue de \$6.6188/m, lo que implica una reducción del 40% en costos directos de soldadura. En términos de costos totales por aro, el proceso SAW requirió una inversión de \$160 por unidad, frente a los \$799 del SMAW, lo que representa un ahorro del 80%. Este ahorro se debe principalmente a la alta eficiencia de deposición (98% en SAW frente a 65% en SMAW) y a la menor intervención de mano de obra (\$0.1512/m en SAW frente a \$3.8691/m en SMAW). Además, la reducción en el tiempo de fabricación incrementa la productividad y permite una mayor capacidad de producción sin comprometer la eficiencia del proceso, consolidando el SAW como la opción más efectiva para la industria minera.

Los resultados obtenidos confirmaron las hipótesis planteadas. Se validó que las variables esenciales del procedimiento SAW optimizan la fabricación de aros de camiones mineros 797F, la calificación bajo ASME Sección IX garantizó el resultado de las uniones soldadas, y la implementación del SAW redujo significativamente los costos, consolidándolo como una opción más eficiente y rentable frente a la soldadura manual.

## RECOMENDACIONES

- Optimizar las variables operativas, como velocidad de soldadura, amperaje, voltaje y tipo de fundente, adaptándolas a las características del material y los requisitos del diseño de los aros, para asegurar resultados de alta calidad y consistentes. Además, establecer un programa de mantenimiento preventivo para los equipos, asegurando su desempeño óptimo y evitando interrupciones inesperadas en la producción.
- Implementar un sistema de monitoreo y control continuo a través de ensayos destructivos y no destructivos, con el objetivo de garantizar la integridad de las uniones soldadas y prevenir defectos críticos. También, realizar estudios para optimizar el uso del fundente, minimizando residuos y mejorando la sostenibilidad económica y ambiental del proceso.
- Realizar vigilancia tecnológica de los avances del proceso SAW, incorporando innovaciones que puedan incrementar tanto la calidad del proceso como la eficiencia, y evaluar su posible aplicación a otros componentes estructurales, maximizando el retorno de inversión y ampliando su impacto positivo en futuras implementaciones.

## REFERENCIAS

- America Welding Society. (2020). AWS D1.1/D1.1M Código de soldadura estructural—Acero. Miami, FL, USA: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
- American Society of Mechanical Engineers. (2021). ASME section IX: Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators. New York: ASME.
- American Welding Society. (1996). *Manual de soldadura* (R. L. O'Brien Ed. 8a ed. Vol. 1). México: Prentice-Hall Hispanoamérica.
- American Welding Society. (2020). AWS A3.0M/A3.0 Standard welding terms and definitions. Miami, FL, USA: American National Standards Institute.
- Antonini, J. M. (2014). Health effects associated with welding. In S. Hashmi, C. Van Tyne, G. Ferreira & B. Yilbas (Eds.), *Comprehensive materials processing* (1st ed., Vol. 13, pp. 49-70). Amsterdam: Elsevier.
- Baghel, P. K. (2022). Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview. *Heliyon*, 8(12), e12161. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12161
- CAPECO. (2024). Tablas salariales: Convención colectiva 2024-2025 del sector construcción. Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. Lima. Acceso el: 09 Ene. 2025. Disponible en: <https://www.ftccperu.com/images/TABLAS%20SALARIALES%20PDF/TablasSalariales2024-2025.pdf>
- CAT. (2024). Camiones para minería 797F. Caterpillar. Acceso el: 19 Dic. 2024. Disponible en: [https://www.cat.com/es\\_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18093014.html](https://www.cat.com/es_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18093014.html)
- COMASA. (2024). Comercial del acero - Catálogo de productos y servicios. Comercial del acero S.A. Lima - Perú. Acceso el: 21 Dic. 2024. Disponible en: <https://comasa.com.pe/catalogos/>
- Diccionario de la lengua española. (2024). Soldar. Real Academia Española, . España. Acceso el: 15 Ene. 2025. Disponible en: <https://dle.rae.es/soldar?m=form>
- DiCecco, S. (2014). *Mechanical and material characterization of mining wheels for enhanced safety*. (Magister - Tesis de posgrado), University of Windsor, Windsor - Ontario - Canada.
- ESAB. (2024). OK Autrod 12.22. ESAB. España. Acceso el: 21 Dic. 2024. Disponible en: [https://esab.com/es/eur\\_es/products-solutions/product/filler-metals/mild-steel/subarc-saw/ok-autrod-12-22/](https://esab.com/es/eur_es/products-solutions/product/filler-metals/mild-steel/subarc-saw/ok-autrod-12-22/)
- INDURA S.A. (2013). *Manual de sistemas y materiales de soldadura*. Chile: INDURA Grupo AIR PRODUCTS.
- ISO 3911. (2021). Wheels and rims for pneumatic tyres — Vocabulary, designation and marking: International Organization for Standardization.
- Jantsa. (2022). Jantsa Wheel at work. Turkey. Acceso el: 19 Dic. 2024. Disponible en: <https://jantsa.com/commercial>
- Jeffus, L. (2017). *Welding: Principles and Applications* (8th ed.). Boston: Cengage Learning.
- Lincoln Electric. (2024a). Idealarc DC-600. The Lincoln Electric Company. México. Acceso el: 24 Dic. 2024. Disponible en: <https://www.lincolnelectric.com/es-MX/products/le-na-dc-600>

- Lincoln Electric. (2024b). NA-5. The Lincoln Electric Company. México. Acceso el: 24 Dic. 2024. Disponible en: <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/products/le-na-na-5>
- Lincoln Electric. (2024c). Posimatic PS30. The Lincoln Electric Company. Gran Bretaña. Acceso el: 24 Dic. 2024. Disponible en: <https://www.lincolnelectric.com/en-GB/Products/w000385394>
- Lincoln Electric. (2024d). Submerged arc welders. The Lincoln Electric Company. Gran Bretaña. Acceso el: 24 Dic. 2024. Disponible en: <https://www.lincolnelectric.com/en-GB/Products/Equipment/Welding-Equipment/Submerged-Arc-Welding-Equipment>
- Machacca Huacarpuma, J. (2018). *Procedimientos de control de calidad de uniones soldadas por fcaw para la fabricación de un tanque de almacenaje para agua industrial*. (Bachiller - Tesis de pregrado), Universidad Católica de Santa María, Arequipa - Perú.
- Marco, A., & Felix, N. (2025). Congo overtakes Peru on copper output, still behind on exports. Reuters. Acceso el: 20 Mar. 2025. Disponible en: <https://www.reuters.com/markets/commodities/congo-overtakes-peru-copper-output-still-behind-exports-2024-03-22/>
- Noruk, J. S., Broman, R. E., Gross, L. K., Hansen, T. B., Mangold, J. V. L., Morris, T. B., Nelson, S. D., Noch, R. F., Phillips, J. S., Weir, M. M., & Woodman, C. L. (2018). Mechanized, automated, and robotic welding. In Kathy Sinnes (Ed.), *Welding Handbook* (10th ed., pp. 452-482). Canada: American Welding Society.
- OSINERGMIN. (2022). Tarifa eléctrica referencial. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. Lima. Acceso el: 09 Ene. 2025. Disponible en: [https://www.osinergmin.gob.pe/Paginas/Folletos/folletos/tarifa\\_electrica\\_residencial.html](https://www.osinergmin.gob.pe/Paginas/Folletos/folletos/tarifa_electrica_residencial.html)
- Perez Kedzi, O. (2019). *Cost evaluation and life cycle assessment of thick plates using SAW and GMAW*. (Magister - Tesis de posgrado -), Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta - Finlandia.
- RIMEX. (2017). Aros para equipos de construcción. RIMEX Supply Ltd. Chile. Acceso el: 19 Dic. 2024. Disponible en: <https://www.rimex.com/es/ulos-y-llantas-2/ulos-para-equipos-de-construccion/>
- RIMEX. (2023). RIMEX Wheel manufacturing process. RIMEX. Australia. Acceso el: 19 Dic. 2024. Disponible en: <https://rimex.com.au/blog/wheel-manufacturing-process/#:~:text=The%20process%20begins%20with%20cutting,bands%2C%20and%20bead%20seat%20bands>
- Rios Cedán, D. A. (2021). *Análisis económico de procedimientos de soldadura para tanque de almacenamiento g/lp fabricado de acero SA612 GR. 90*. (Bachiller - Tesis de pregrado), Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Perú.
- Silva, A. C. S., Araújo, H. R., Macena, V. A., Moreno, J. R. S., Vicente, A. A., Hermenegildo, T. F. C., & Santos, T. F. A. (2019). Aplicação da metodologia para qualificação de procedimentos de soldagem de tubulações industriais conforme parâmetros dos códigos ASME B31.3 e ASME SECTION IX. *Soldagem & Inspeção*, 24, e2423. doi: 10.1590/0104-9224/si24.23
- Singh, R. (2020). Welding and joining processes. In Ramesh Singh (Ed.), *Applied welding engineering: Processes, codes, and standards* (3rd ed., pp. 157-186). Oxford: Elsevier.
- Titan Mining Services. (2022). Catálogo de aros y sus componentes para maquinaria minera, construcción e industrial. Aros del Pacífico S.A.C. Lima - Perú. Acceso. Disponible en: <https://aros.com.pe/catalogos/>

- Vijayan, V. (2008). *Numerical model development of a heavy mining vehicle multi-piece wheel assembly for structural analysis*. (Magister - Tesis de posgrado), University of Windsor, Windsor - Ontario - Canada.
- Welding Handbook Committee. (2004). *Welding handbook* (Annette O'Brien Ed. 9th ed. Vol. 2). Canada: American Welding Society.
- Weman, K. (2012a). Submerged arc welding. In Klas Weman (Ed.), *Welding processes handbook* (2nd ed., pp. 105-117). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Weman, K. (2012b). Welding costs. In Klas Weman (Ed.), *Welding processes handbook* (2nd ed., pp. 259-266). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Zea Pilco, D. E. (2016). *Estudio comparativo entre los procesos FCAW vs SAW para la fabricación de recipientes usados en el transporte de Concentrado de Cu*. (Bachiller - Tesis de pregrado), Universidad Nacional San Agustín, Arequipa - Perú.

## ANEXOS

|  |   |
|--|---|
| Anexo 1: Matriz de Consistencia.....                                       | 1 |
| Anexo 2: Especificación de procedimiento de soldadura (WPS .....           | 3 |
| Anexo 3: Registro de calificación de procedimiento de soldadura (PQR)..... | 5 |
| Anexo 4: Registro de calificación de operadores y soldadores (WQR) .....   | 7 |

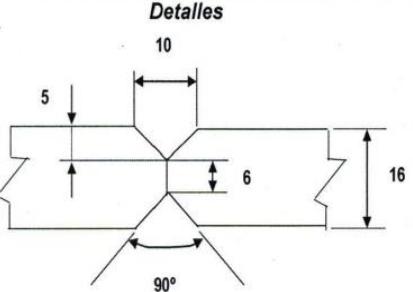
## Anexo 1: Matriz de Consistencia

| TITULO: PROPUESTA DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO PARA LA MEJORA DE LA FABRICACIÓN DE AROS DE CAMIONES MINEROS 797F   |   |   |  |  |
|---|---|---|--|--|
| PROBLEMAS   | OBJETIVOS   | HIPÓTESIS   | VARIABLES  | METODOLOGÍA  |
| <p><b>Problema General</b><br/>¿Cómo la propuesta del proceso de soldadura por arco sumergido mejora la fabricación de aros de camiones mineros 797F?</p>   | <p><b>Objetivo General</b><br/>Proponer el proceso de soldadura por arco sumergido para la mejora de la fabricación de aros de camiones mineros 797F.</p>   | <p><b>Hipótesis General</b><br/>La propuesta del uso del proceso de soldadura por arco sumergido en la fabricación de aros de camiones mineros 797F mejorará significativamente las uniones soldadas en los aros, específicamente en términos de resistencia estructural y durabilidad, con ello se reducirá defectos de fabricación.</p>   | <p><b>Variable Independiente (VI):</b> Proceso de soldadura por arco sumergido.</p> <p><b>Variable Dependiente (VD):</b> Fabricación de aros de camiones mineros 797F.</p> | <p><b>Tipo de Investigación:</b> Aplicada</p> <p><b>Nivel de Investigación:</b> Predictivo</p> <p><b>Diseño de Investigación:</b> No experimental</p>  |
| <p><b>Problemas Específicos</b><br/>1). ¿En qué medida las variables esenciales del procedimiento de soldadura por arco sumergido contribuyen en la fabricación de aros de camiones mineros 797F?<br/>2). ¿Cómo se puede calificar el procedimiento de soldadura por arco sumergido y al operador del proceso según la norma internacional ASME sección IX?<br/>3). ¿Existe diferencia en costo beneficio después de la implementación del proceso de</p> | <p><b>Objetivos Específicos</b><br/>1). Determinar las variables esenciales del procedimiento de soldadura por arco sumergido en la fabricación de aros de camiones mineros 797F.<br/>2). Calificar el procedimiento de soldadura por arco sumergido y al operador del proceso según la norma internacional ASME sección IX.<br/>3). Comparar el costo beneficio de la implementación del proceso</p> | <p><b>Hipótesis Específicos</b><br/>1). Las variables esenciales del procedimiento de soldadura por arco sumergido facilitan la fabricación adecuada de aros de camiones mineros 797F.<br/>2). La aplicación de los criterios de calificación para el procedimiento de soldadura por arco sumergido y para el operador del proceso establecidos en la norma internacional ASME Sección IX garantizará la consistencia y fiabilidad de las uniones soldadas.</p> |  | <p><b>Población y Muestra:</b></p> <p><b>Población:</b> Conformada por todos los aros de camiones mineros modelo 797F que se fabrican o podrían fabricarse utilizando el proceso de soldadura por arco sumergido.</p> <p><b>Muestra:</b> Uniones soldadas por el proceso de arco sumergido en materiales de acero a emplear en la fabricación de aros de camiones mineros 797F.</p> <p><b>Técnicas e Instrumentos:</b></p> <p><b>Instrumentos:</b> informes, reportes de ensayos físicos, formatos de procedimientos de soldadura y calificación.</p> <p><b>Técnicas:</b> Las técnicas serán basadas en los protocolos de las normas</p> |
|   |   | 3). Existe reducción de los costos totales de producción después de la implementación   |  |  |

| <b>TITULO: PROPUESTA DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO PARA LA MEJORA DE LA FABRICACIÓN DE AROS DE CAMIONES MINEROS 797F</b>         |  |   |                  |  |
|--|--|---|------------------|--|
| <b>PROBLEMAS</b>   | <b>OBJETIVOS</b>   | <b>HIPÓTESIS</b>  | <b>VARIABLES</b> | <b>METODOLOGÍA</b>   |
| soldadura por arco sumergido en comparación con el proceso de soldadura convencional manual en la fabricación de aros de camiones mineros 797? | de soldadura por arco sumergido con respecto al proceso de soldadura convencional manual en la fabricación de aros de camiones mineros 797F. | del proceso de soldadura por arco sumergido y el proceso de soldadura convencional manual en la fabricación de aros de camiones mineros 797F. |                  | <p>internacionales referentes a soldadura para recipientes a presión</p> <p><b>Análisis y Procesamiento de Datos:</b><br/>El análisis de datos se realizará mediante técnicas estadísticas y evaluación de resultados.</p> |

Anexo 2: Especificación de procedimiento de soldadura (WPS)

|   |  |            |                        |
|---|--|------------|------------------------|
|  | <b>ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA<br/>(WPS)</b><br><i>(De acuerdo a ASME Sección IX)</i> |            | <b>WPS No. ADP W01</b> |
|   | HOJA:  | 1 de 2     |                        |
|   | EMISION:   | 2005/10/11 |                        |
|   | REVISION:  | 1          |                        |

| <b>QW-482 - ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)</b>   |   |  |        |                   |  |
|---|---|--|--------|-------------------|--|
| Nombre de la compañía:  | <b>Aros del Pacifico S.A.C.</b>   |  | Por:   | <b>IVAN MEZA</b>  |  |
| Especificación de Procedimiento No.:  | <b>ADP W01</b>  |  | Fecha: | <b>2005/10/11</b> |  |
| Revisión No.:   | <b>01</b>   |  | Fecha: | <b>2005/10/11</b> |  |
| Proceso(s) de soldadura:  | <b>SAW</b>  |  | Tipo:  | <b>Automatica</b> |  |
| <b>JUNTA (QW-402)</b>   | <b>Detalles</b><br><br>Dimensiones en mm.   |  |        |                   |  |
| Esquema, dibujo de fabricación, símbolos de soldadura o descripción escrita debe mostrar el arreglo general de las partes ha ser soldadas. Donde sea aplicable, la apertura de raíz y los detalles de la soldadura debe ser especificada. |   |  |        |                   |  |
| <b>METAL BASE (QW-403)</b>  | Nº P: <b>1</b> Grupo Nº: <b>1</b> al Nº P: <b>1</b> Grupo Nº: <b>2</b><br>O<br>Especificación de tipo y grado: <b>ASTM A36</b><br>A la especificación de tipo y grado: <b>ASTM A105</b><br>O<br>Análisis químico y propiedades mecánicas:<br>Hasta el análisis químico y propiedades mecánicas: |  |        |                   |  |
| Rango de espesores  | Metal base: Ranura: <b>15.9mm</b> Filete: -<br>Diam. Tubo Ranura: <b>1448mm</b> Filete: -<br>Otro   |  |        |                   |  |
| <b>METAL DE APORTE (QW-404)</b>   | Especificación Nº (SFA) <b>A 5.17</b><br>AWS No (Clase) <b>F7A4 - EM12K - Ni1</b><br>Nº F <b>6</b><br>Nº A <b>1</b><br>Tamaño del electrodo <b>3.25mm</b>   |  |        |                   |  |
| Metal depositado  | Rango de espesores<br>Ranura <b>5 mm -31.8mm</b><br>Filete -<br>Fundente (clase) <b>AGLOMERADO</b><br>Fundente nombre comercial -<br>Inserto consumible -   |  |        |                   |  |
|    |   |  |        |                   |  |



## ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

(De acuerdo a ASME Sección IX)

|                        |                   |
|------------------------|-------------------|
| <b>WPS No. ADP W01</b> |                   |
| OJA:                   | 2 de 2            |
| MISSION:               | <b>2005/10/11</b> |
| EVISION:               | 1                 |

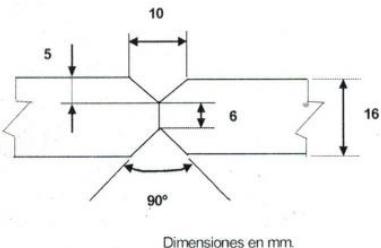
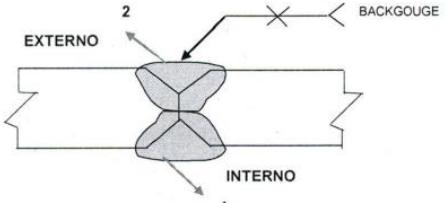
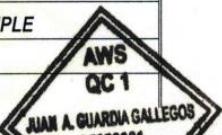
|  |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
|--|-------------|------------------------|-------------|--|------------------|----------------|-------------------------------------|--------------|
| <b>POSICIONES (QW-405)</b>   |             |                        |             | <b>TRATAMIENTO DE POST-CALENTAMIENTO</b> |                  |                |                                     |              |
| Posicion(es) de ranura   |             | <b>PLANA</b>           |             | Rango de temperatura: _____              |                  |                |                                     |              |
| Progresión: Asc: _____   |             | Desc: _____            |             | Tiempo: _____                            |                  |                |                                     |              |
| Posición de filete _____   |             |                        |             | <b>GAS (QW-408)</b>                      |                  |                |                                     |              |
| <b>PRECALENTAMIENTO (QW-406)</b>   |             |                        |             | Composición Porcentual                   |                  |                |                                     |              |
| Temp. Precalentamiento   |             | Mín: _____             |             | Gas(es)                                  | Mezcla           | Flujo          |                                     |              |
| Temp. Interpase  |             | Máx: _____             |             | Protección                               | -                | -              | -                                   |              |
| Mantenimiento precalentamiento: _____  |             |                        |             | Arrastre                                 | -                | -              | -                                   |              |
|  |             |                        |             | Respaldo                                 | -                | -              | -                                   |              |
| <b>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)</b>   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Corriente AC o DC  |             | DC                     |             | Polaridad                                | EP               |                |                                     |              |
| Rango de amperaje  |             | <b>VER TABLA</b>       |             | Rango de voltaje                         | <b>VER TABLA</b> |                |                                     |              |
| Tamaño y tipo de electrodo de tungsteno _____<br>(Tungsteno puro, 2% toriado, etc)   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Modo de transferencia en GMAW _____<br>(Arco spray, corto circuito, etc)             |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Velocidad de alimentación de alambre _____   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| <b>TÉCNICA</b>   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Pase ancho o angosto _____ <b>ANCHO</b>  |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Orificio o tamaño de protección gaseosa _____  |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Limpieza inicial y entrepasadas (escobillado, esmerilado, etc) _____ <b>TORNEADO</b> |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Método de resane de raíz _____   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Oscilación <b>RECTILINEO</b>   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Distancia de boquilla a pieza de trabajo <b>15 - 25mm</b>                            |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Pase múltiple o simple <b>SIMPLE</b>   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Electrodo simple o múltiple <b>SIMPLE</b>  |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Velocidad de avance (rango) <b>VER TABLA</b>   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Martilleo _____  |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| Otro _____   |             |                        |             |  |                  |                |                                     |              |
| <b>Pase N°</b>   | <b>Proc</b> | <b>Metal de aporte</b> |             | <b>Corriente</b>                         |                  | <b>Voltaje</b> | <b>Velocidad de avance (cm/min)</b> | <b>Otros</b> |
|  |             | <b>Clase</b>           | <b>Diam</b> | <b>Polaridad</b>                         | <b>Amperaje</b>  |                |                                     |              |
| 1  | SAW         | F7A4 - EM12K-Ni1       | 3.25mm      | DCEP                                     | 500 - 520A       | 31 - 33V       | 90 - 92                             |              |
| 2 (atras)  | SAW         | F7A4 - EM12K-Ni1       | 3.25mm      | DCEP                                     | 520 - 540A       | 31 - 33V       | 83 - 85                             |              |

*John Ward*



### Anexo 3: Registro de calificación de procedimiento de soldadura (PQR)

|  |  |                |                         |
|--|--|----------------|-------------------------|
|  <p><b>Aros del Pacífico S.A.C.</b></p> | <b>REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO<br/>DE SOLDADURA (PQR)</b><br><i>(De acuerdo a ASME Sección IX)</i> |                | <b>PQR No. ADP P001</b> |
|  | HOJA:  | 1 de 2         |                         |
|  | EMISION:   | 2005 / 10 / 11 |                         |
|  | REVISION:  | 1              |                         |

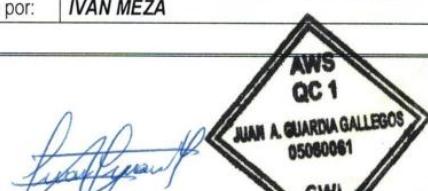
| <b>QW-482 – REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (PQR)</b>   |                                 |   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
|--|---------------------------------|---|-----------------------|------------------------|--|--|---------|--------|-------|----------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
| Nombre de la compañía:   | <b>AROS DEL PACIFICO S.A.C.</b> | Por:  | <b>IVAN MEZA</b>      |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| Calificación de Procedimiento (PQR) No.  | <b>ADP P001</b>                 | Fecha:  | <b>2005 / 10 / 11</b> |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| WPS N°.  | <b>ASP W001</b>                 |   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| Proceso(s) de soldadura:   | <b>SAW</b>                      | Tipo:   | <b>AUTOMATICO</b>     |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| <b>JUNTA (QW-402)</b> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Dimensiones en mm.</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> |                                 |   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| <b>METAL BASE (QW-403)</b> <p>Especificación material <b>ASTM A36 a ASTM A105</b></p> <p>Tipo o grado <b>--</b></p> <p>P – No. <b>1</b> a P – No. <b>1</b></p> <p>Espesor de probeta <b>15.9mm</b></p> <p>Diámetro de probeta <b>1448mm</b></p> <p>Otro <b>--</b></p> <p><b>--</b></p> <p><b>--</b></p>  |                                 | <b>TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA (QW-407)</b> <p>Temperatura <b>--</b></p> <p>Tiempo <b>--</b></p> <p>Otro <b>--</b></p>   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| <b>METAL DE APORTE (QW-404)</b> <p>Especificación SFA <b>A5.17</b></p> <p>Clasificación AWS <b>F7A4 - EM12K - Ni1</b></p> <p>Metal de aporte F – No. <b>6</b></p> <p>Análisis de metal depositado A – No. <b>1</b></p> <p>Tamaño de metal de aporte: <b>3.25mm</b></p> <p>Otro <b>--</b></p> <p><b>--</b></p>  |                                 | <b>GAS (QW-408)</b> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Composición Porcentual</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mezcla</th> <th>Flujo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Protección <b>--</b></td> <td><b>--</b></td> <td><b>--</b></td> </tr> <tr> <td>Arrastre <b>--</b></td> <td><b>--</b></td> <td><b>--</b></td> </tr> <tr> <td>Respaldo <b>--</b></td> <td><b>--</b></td> <td><b>--</b></td> </tr> </tbody> </table> |                       | Composición Porcentual |  |  | Gas(es) | Mezcla | Flujo | Protección <b>--</b> | <b>--</b> | <b>--</b> | Arrastre <b>--</b> | <b>--</b> | <b>--</b> | Respaldo <b>--</b> | <b>--</b> | <b>--</b> |
| Composición Porcentual   |                                 |   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| Gas(es)  | Mezcla                          | Flujo   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| Protección <b>--</b>   | <b>--</b>                       | <b>--</b>   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| Arrastre <b>--</b>   | <b>--</b>                       | <b>--</b>   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| Respaldo <b>--</b>   | <b>--</b>                       | <b>--</b>   |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| <b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409)</b> <p>Corriente <b>DC</b></p> <p>Polaridad <b>EP</b></p> <p>Amperaje <b>500 - 540</b> Voltaje <b>31 - 33</b></p> <p>Tamaño de electrodo de tungsteno: <b>--</b></p> <p>Otro <b>--</b></p>  |                                 | <b>TECNICA (QW-410)</b> <p>Velocidad de avance <b>83cm/min - 92cm/min</b></p> <p>Pasada ancha o angosta <b>--</b></p> <p>Oscilación <b>NO</b></p> <p>Pase simple o múltiple <b>SIMPLE</b></p> <p>Electrodo simple o múltiple <b>SIMPLE</b></p> <p>Otro <b>--</b></p>  |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |
| <b>PRECALENTAMIENTO (QW-406)</b> <p>Temperatura de precalentamiento <b>--</b></p> <p>Temperatura entre pases <b>--</b></p>   |                                 |    |                       |                        |  |  |         |        |       |                      |           |           |                    |           |           |                    |           |           |

|  |  |                         |                       |
|--|--|-------------------------|-----------------------|
|  <p><b>Aros del Pacífico S.A.C.</b></p> | <p><b>REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO<br/>DE SOLDADURA (PQR)</b><br/><i>(De acuerdo a ASME Sección IX)</i></p> | <b>PQR No. ADP P001</b> |                       |
|  |  | HOJA:                   | 2 de 2                |
|  |  | EMISION:                | <b>2005 / 10 / 11</b> |
|  |  | REVISION                | 1                     |

| Pase      | Proceso | Metal de Aporte    |           | Corriente        |           | Voltaje | Velocidad de Avance cm/min |
|-----------|---------|--------------------|-----------|------------------|-----------|---------|----------------------------|
|           |         | Clase              | Diam (mm) | Tipo y polaridad | Amperaje  |         |                            |
| 1         | SAW     | F7A4 - EM12K - Ni1 | 3.25      | DCEP             | 500 - 520 | 31 - 33 | 90 - 92                    |
| 2 (atrás) | SAW     | F7A4 - EM12K - Ni1 | 3.25      | DCEP             | 520 - 540 | 31 - 33 | 83 - 85                    |
| --        |         |                    |           |                  |           |         |                            |
| --        |         |                    |           |                  |           |         |                            |

| PRUEBAS DE TENSION   |                            |                                  |                         |  |                       |                           | PQR No.        | ADP P001 |
|--|----------------------------|----------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|---------------------------|----------------|----------|
| Especimen No.  | Ancho (mm)                 | Espesor (mm)                     | Area (mm <sup>2</sup> ) | Carga rotura total (KN)                            | Resistencia máx.(Mpa) | Tipo de falla y ubicación |                |          |
| TA - 1   | 19.05                      | 9.57                             | 182.3                   | 92.0   | 504                   | Rotura en el Mat. Base    |                |          |
| TA - 2   | 19.05                      | 9.57                             | 182.3                   | 92.3   | 506                   | Rotura en el Mat. Base    |                |          |
| --   |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| --   |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| ENSAYOS DE DOBLEZ GUIADO   |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| Tipo y figura No.  |                            |                                  |                         | Resultado  |                       |                           |                |          |
| DE LADO 1  |                            |                                  |                         | ACEPTABLE  |                       |                           |                |          |
| DE LADO 2  |                            |                                  |                         | ACEPTABLE  |                       |                           |                |          |
| DE LADO 3  |                            |                                  |                         | ACEPTABLE  |                       |                           |                |          |
| DE LADO 4  |                            |                                  |                         | ACEPTABLE  |                       |                           |                |          |
| PRUEBA DE IMPACTO  |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| Especimen No.  | Ubicación de muesca        | Tamaño de especimen              | Temperatura de ensayo   | Valores de impacto                                 |                       |                           | Peso de rotura |          |
|  |                            |                                  |                         | Fuerza   | % corte               | Mils                      |                |          |
|  |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
|  |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
|  |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
|  |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
|  |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| PRUEBA EN SOLDADURA DE FILETE  |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| Resultado satisfactorio: Si  | No                         | Penetración en metal origen: Yes |                         |  | No                    |                           |                |          |
| Resultados de macroataque  |                            | ---                              |                         |  |                       |                           |                |          |
| OTRAS PRUEBAS  |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| Tipo de prueba   |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| Análisis de depósito   |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| Otro   |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| Nombre soldador  | Gabriel David Diaz Machuca |                                  |                         | Estampa No.  | ADP S001              |                           |                |          |
| Pruebas Mecánicas conducidas por:  | CWI Pedro Coloma           |                                  |                         | Prueba de laboratorio No : CTSE 01- 2005 / 10 / 10 |                       |                           |                |          |
| Prueba conducida por:  | CWI Pedro Coloma Vera      |                                  |                         | Nro. CWI:  | 01060591              |                           |                |          |
| Nosotros certificamos que los datos en este registro son correctos y que las probetas fueron preparados, soldados y ensayados de acuerdo con los requerimientos de la Sección IX del Código ASME |                            |                                  |                         |  |                       |                           |                |          |
| Fabricante   | Aros del Pacifico S.A.C.   |                                  |                         | Elaborado por:                                     | IVAN MEZA             |                           |                |          |
| Fecha  | 2005 / 10 / 11             |                                  |                         | Autorizado por:                                    | IVAN MEZA             |                           |                |          |

6



## Anexo 4: Registro de calificación de operadores y soldadores (WQR)

|  |           |  |                         |   |           |   |  |
|--|-----------|--|-------------------------|---|-----------|---|--|
|  <b>Aros del Pacífico S.A.C.</b>  |           | <b>REGISTRO DE CALIFICACION DE SOLDADOR</b><br><i>De acuerdo al código ASME - Sección IX</i>           |                         |   |           | <b>WOPQ No. ADP S01</b><br>HOJA: 1 de 1<br>EMISION: 11-10-2005<br>REVISION: 1 |  |
| <b>REGISTRO DE LA CALIFICACION DEL OPERADOR DE SOLDADURA (WOPQ)</b>  |           |  |                         |   |           |   |  |
| Nombre del Soldador: <b>Gabriel David Diaz Machuca</b>   |           | No. Estampa: <b>01</b>   | WPQ No.: <b>ADP S01</b> | DNI: <b>25743555</b>                                  |           |   |  |
| Identificación de WPS seguido por el soldador: <b>ADP W001</b>   |           | Evaluado en: <input checked="" type="checkbox"/> Probeta <input type="checkbox"/> Soldadura Producción |                         |   |           |   |  |
| Especificación de metal base: <b>ASTM A36 / ASTM A105</b>  |           | Espesor: <b>15.9 mm</b>  |                         |   |           |   |  |
| Variables de soldadura   |           | Valor Usado en la Calificación   |                         | Rango Calificado                                      |           |   |  |
| Proceso de Soldadura:  |           | <b>SAW</b>   |                         | <b>SAW</b>  |           |   |  |
| Tipo usado (manual, semiautomático):   |           | <b>AUTOMATICO</b>  |                         | -   |           |   |  |
| Respaldo(metal, soldadura):  |           | <b>CON RESPALDO</b>  |                         | <b>No Aplicable (Ver QW-354)</b>                      |           |   |  |
| ( <input type="checkbox"/> ) Plancha ( <input checked="" type="checkbox"/> ) Tubería (ingrese diámetro, si es tubería):  |           | <b>Ø 1448 mm</b>   |                         | <b>Ø 73 mm - ILIMITADO</b>                            |           |   |  |
| Metal Base No. P o S a No. P o S   |           | <b>P1 a P1</b>   |                         | <b>P1 a P1</b>  |           |   |  |
| Especificación metal aporte (SFA)  |           | <b>SFA 5.17</b>  |                         |   |           |   |  |
| Clasificación metal aporte   |           | <b>F7A4 - EM12K - Ni1</b>  |                         | <b>F6</b>   |           |   |  |
| Metal de aporte No. F:   |           | <b>F6</b>  |                         |   |           |   |  |
| Con Material de aporte:  |           | -  |                         | -   |           |   |  |
| Inserto Consumible: (GTAW o PAW):  |           | -  |                         | -   |           |   |  |
| Tipo de aporte (GTAW o PAW):   |           | -  |                         | -   |           |   |  |
| Espesor depositado por cada proceso:   |           | <b>15.9 mm de F6</b>   |                         | <b>Hasta 31.8 mm de F6</b>                            |           |   |  |
| Posición calificada:   |           | <b>1G</b>  |                         | <b>Ranurado y Filete : plana</b>                      |           |   |  |
| Progresión vertical (ascendente/descendente):  |           | -  |                         | -   |           |   |  |
| Tipo de gas combustible (OFW):   |           | -  |                         | -   |           |   |  |
| Gas Inerte de respaldo (GTAW, PAW, GMAW):  |           | -  |                         | -   |           |   |  |
| Modo de Transferencia (GMAW):  |           | -  |                         | -   |           |   |  |
| Corriente Tipo/Polaridad (GTAW):   |           | -  |                         | -   |           |   |  |
| <b>RESULTADOS</b>  |           |  |                         |   |           |   |  |
| Resultado de Inspección Visual: <b>ACEPTABLE</b>   |           |  |                         |   |           |   |  |
| Resultados de Prueba de Doblez: <b>ACEPTABLE</b>   |           |  |                         |   |           |   |  |
| ( <input type="checkbox"/> ) Lado  |           | ( <input checked="" type="checkbox"/> ) Cara y Raíz Transversal  |                         | ( <input type="checkbox"/> ) Cara y Raíz Longitudinal |           |   |  |
| ( <input type="checkbox"/> ) Tubería, Resistencia a la corrosión   |           | ( <input type="checkbox"/> ) Plancha, resistencia a la corrosión                                       |                         |   |           |   |  |
| ( <input type="checkbox"/> ) Tubería, Prueba de ataque químico   |           | ( <input type="checkbox"/> ) Plancha, Prueba de ataque químico   |                         |   |           |   |  |
| Type   | Resultado | Type   | Resultado               | Type  | Resultado |   |  |
| Lado   | <b>OK</b> | Lado   | <b>OK</b>               | --  | --        |   |  |
| Lado   | <b>OK</b> | Lado   | <b>OK</b>               | --  | --        |   |  |
| Resultado de examen radiográfico alternativo: -  |           |  |                         |   |           |   |  |
| Soldadura de filete: Prueba de fractura: -   |           | Longitud y porcentaje de defectos: -   |                         |   |           |   |  |
| Macro ataque: -  |           | Tamaño de filete: -  |                         | Concavidad/Convexidad: -                              |           |   |  |
| Otras Pruebas: -   |           |  |                         |   |           |   |  |
| Película o muestras evaluadas por: -   |           | Compañía: <b>EXSA S.A.</b>   |                         |   |           |   |  |
| Pruebas Mecánicas conducidas por: <b>PEDRO COLOMA VERA</b>   |           | Prueba de Laboratorio No: <b>CTSE 01 - 2005 / 10 / 10</b>  |                         |   |           |   |  |
| Soldadura supervisada por: <b>PEDRO COLOMA VERA</b>  |           |  |                         |   |           |   |  |
| Nosotros certificamos que los datos registrados son correctos y que las probetas fueron preparadas, soldadas y probadas de acuerdo a los requerimientos del Código ASME Sección IX - 2004. |           |  |                         |   |           |   |  |
| Elaborado por: Ivan Meza   |           | Organización: <b>AROS DEL PACIFICO S.A.C.</b>  |                         |   |           |   |  |
| Fecha: <b>2005 / 10 / 11</b>   |           | Por: <b>Ivan Meza</b>  |                         |   |           |   |  |