

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**FACTIBILIDAD DEL USO DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW
SEMIAUTOMATIZADO Y ROBOTIZADO EN ALEACIONES DE ALUMINIO
5052-H32 CON MATERIAL DE APORTE ER4043**

POR

ENRIQUE ALEJANDRO CAVAZOS HERNÁNDEZ

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO NOVIEMBRE DEL 2016

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**FACTIBILIDAD DEL USO DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW
SEMIAUTOMATIZADO Y ROBOTIZADO EN ALEACIONES DE ALUMINIO
5052-H32 CON MATERIAL DE APORTE ER4043**

POR

ENRIQUE ALEJANDRO CAVAZOS HERNÁNDEZ

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO NOVIEMBRE 2016

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de este trabajo con número de CVU 717799.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. (COMIMSA) Unidad Saltillo, por la beca otorgada con matrícula 15ES-210 y por las facilidades para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

A la Dra. Alejandra Hernández Rodríguez por su invaluable ayuda al guiarme en la realización de este trabajo, su paciencia, su tiempo, sus consejos, su dedicación y sobre todo su amistad.

A la Dra. Pamela Chiñas Sánchez, al Dr. Melvyn Álvarez Vera, al Ing. Fernando Macías López, al Dr. Juan Carlos Díaz Guillén y al Dr. Pilar Orozco Gonzáles por su apoyo incondicional, su tiempo para revisar este escrito y por sus valiosas aportaciones.

Un agradecimiento al personal del Posgrado en Tecnología de Soldadura Industrial: A la Lic. María del Pilar Granillo Velázquez, Dra. Nohemí Ibarra Castro, Dr. Rolando Javier Praga Alejo, Dra. Rocío Saldaña Garcés, Dra. Rita Muñoz Arroyo, Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez, Dra. Alejandra Hernández Rodríguez, M.C. Fernando Macías López, Ing. José Eduardo Valdés González, Dra. Gladys Yerania Pérez Medina, Dr. Elías Gabriel Carrum Siller.

Al grupo DIDSA y al Ing. Alonso Lozano Salazar por la facilidad brindada para llevar a cabo la estancia industrial realizada durante los estudios de especialización.

DEDICATORIA

Gracias a mis padres y hermanos por creer en mí, por su apoyo incondicional que me han brindado durante esta etapa y por sus consejos, que de una u otra forma se han aplicado. A mis compañeros por trabajar siempre en equipo para sacar adelante cada materia y cada seminario. A los Doctores de Posgrado que nos impartieron las materias para que podamos aprender y que sin ellos no sería posible el entendimiento de este trabajo y sobre todo a la Dra. Alejandra Hernández Rodríguez que siempre ha estado a mi lado ayudándome a entender mis dudas a pesar de que ella tuviera mucho trabajo.

La culminación de este trabajo es gracias a todos ellos que estuvieron conmigo durante la especialidad, en las buenas y en las malas, durante mi preparación para cada examen y sobre todo en la práctica.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA	vi
SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo general.....	9
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
1.3 Justificación.....	9
1.4 Planteamiento del problema.....	9
1.5 Aportación tecnológica	10
1.6 Alcances.....	10
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1 Fundamentos de la soldadura.....	11
2.1.1 Clasificación de los procesos de soldadura.....	12
2.1.2 Definición y clasificación del robot industrial.....	14
2.1.3 Elementos de robots.....	16
2.1.4 Generalidades del robot KUKA KR16-2.....	19
2.1.5 Mecánica del robot.....	20
2.1.6 Generalidades de la soldadura por arco de metal y gas.....	21
2.2 El Proceso GMAW	25
2.2.1 Fundamentos.....	25
2.3 Control de calidad	53
2.3.1 Ensayos destructivos.....	53
2.3.2 Ensayos no destructivos	56
2.4 Aleaciones de Aluminio	60
2.4.1 Características del aluminio.....	60
2.4.2 Estructura de los metales	61
2.4.3 Control del tamaño del grano.....	62
2.4.4 Trabajo en frío	63

2.4.5 Problemas de la solubilidad en el Aluminio.....	64
2.4.6 Elementos aleantes, clasificación y designación	69
2.4.7 Composición química, propiedades físicas y mecánicas de la aleación 5052 y composición química del electrodo ER4043	80
CAPÍTULO 3 Discusión y análisis de bibliografía	81
CAPÍTULO 4 Conclusiones	84
CAPÍTULO 5 Trabajo futuro.....	86
Bibliografía	91

SÍNTESIS

En el presente trabajo monográfico se recopiló información acerca del proceso de soldadura GMAW semiautomatizado y robotizado aplicado en aleaciones de aluminio de la serie 5XXX, donde una de las principales discontinuidades que se presentan una vez llevada a cabo la unión del metal base con el metal de aporte es la porosidad que se genera debido a la influencia de varias variables como: mezcla de gases, modo de transferencia y metal de aporte.

Un factor importante a considerar después de la soldadura es la evaluación de la calidad por medio de los ensayos destructivos y no destructivos para determinar las propiedades mecánicas, así como la sanidad del cordón.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La característica principal que marca la diferencia entre las máquinas semiautomáticas de las automáticas es su versatilidad (la cual es la capacidad que tiene la máquina de ser adaptada a diversas funciones a través de cambios simples en su programación o accesorios; como ejemplo se puede interpretar como máquina automática un robot). Actualmente los robots se pueden utilizar en prácticamente cualquier tarea que el ser humano desee realizar, optimizando tiempo, eliminando costos y sustituyendo el uso intensivo de mano de obra con la intención de proteger a los operadores frente a ambientes hostiles y trabajos peligrosos. El registro de la palabra robot fue introducido al mundo por primera vez en el año 1920 por el escritor checo Karel Čapek mencionado por primera vez en una de sus obras de teatro “R. U. R.”, Robots Universales Rossum, la cual deriva del término “*robota*” que significa “*trabajo*”. El robot surge como una consecuencia del proceso de automatización del sector industrial.

Analizando el panorama general actual en el país, el sector industrial es un elemento crítico para el progreso económico debido al efecto que puede tener en los niveles de inversión, empleo y en el crecimiento de la economía. De igual manera, el desarrollo del sector industrial es indispensable para elevar el nivel tecnológico/científico. Diversas industrias han sido favorables para el desarrollo productivo y la consolidación de las cadenas productivas. En concreto, la

industria automotriz es clave para el incremento en la tasa de industrialización y competitividad de México en sectores de alto valor agregado.

En los últimos años, la industria automotriz se ha enfocado en perfeccionar los procesos de tecnologías de unión en componentes críticos para vehículos ligeros y pesados utilizados cada día más.

Actualmente, el proceso de soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding, por sus siglas en inglés) es ampliamente utilizado en la unión de materiales de alta densidad, lo cual representa una pérdida energética cuando posee una elevada relación resistencia mecánica/peso como materiales de alta densidad como por ejemplo el acero que tiene una densidad de 7.8 gr/cm^3 . Por tal motivo actualmente se está estudiando la factibilidad de sustituir aquellos materiales con una elevada relación por materiales que posean una baja relación resistencia mecánica/peso como es el caso del uso de aleaciones de aluminio que tienen una densidad de 2.7 gr/cm^3 .

El químico británico Sir Humphrey Davy descubrió la existencia del aluminio en la primer década del siglo XIX, posteriormente en el año de 1825 este elemento fue aislado por el físico y químico Hans Christian Ørsted y no fue hasta el año de 1886 que la extracción de aluminio, a través de la bauxita, se convirtió en un proceso industrial verdaderamente viable. Los procesos de extracción del aluminio han ido mejorando con el paso del tiempo, siendo primero el proceso Bayer (ver Figura 1. 1) y el segundo el proceso Hall (ver Figura 1. 2).

El proceso Bayer fue patentado por el químico austriaco Karl Bayer en el año de 1889, dicho proceso utilizaba una solución de hidróxido de sodio o sosa cáustica (NaOH) para la extracción de la alúmina a partir de la bauxita.

Un proceso anterior al patentado por Bayer fue el proceso Le Chatelier desarrollado a partir del año 1869 para producir alúmina, este proceso mezclaba la bauxita con carbonato de sodio (Na_2CO_3) y se mantenía dentro de un horno a una temperatura de 1000 a 1100 °C. Como resultado se obtenía aluminato de sodio (NaAlO_2) que por medio de un proceso de lixiviación a 80 °C se obtenía una solución de aluminio de la que se precipitaba la alúmina por medio de la interacción del CO_2 en el horno. El proceso Le Chatelier fue perdiendo competitividad desde la aparición del proceso Bayer hasta quedar casi desbancado a finales de los años 1940's. Desde la década de los 1960's toda la alúmina producida en el mundo era obtenida por el proceso Bayer.

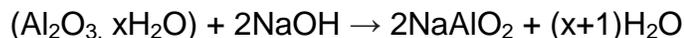
El proceso Bayer es el método industrial más utilizado para producir alúmina (material con una consistencia similar a la arena fina) a partir de la bauxita. Aunque las condiciones del proceso son influenciadas por el tipo de bauxita, hay cinco etapas principales para extraer el aluminio primario que utilizan todas las plantas industriales que se dedican a la extracción del aluminio a partir de la bauxita. Las etapas de extracción del proceso Bayer son:

1. Molienda

Es la reducción del tamaño del mineral (bauxita) con el fin de incrementar y facilitar su manejo; esto se logra a través de la trituración (molienda) del mineral pre-lavado.

2. Digestor

Consiste en que una vez que la bauxita esta triturada y pre-lavada, el hidróxido de sodio (NaOH) se mezcla con la alúmina en el reactor (digestor), el cual estará ≈ 180 °C y a altas presiones para formar una solución enriquecida de aluminato de sodio (NaAlO_2), de acuerdo a la reacción siguiente:



Las condiciones dentro del reactor como la concentración, la temperatura y la presión varían según las propiedades de la bauxita utilizada. Aunque las temperaturas más altas son teóricamente favorables, éstas producen problemas de corrosión y la posibilidad de que se encuentren otros óxidos (además de la alúmina) disueltos en el líquido cáustico. Las plantas modernas operan entre unos 200 y 240 °C y pueden implicar presiones de $\approx 30 \text{ atm}$.

3. Filtración

Consiste en separar (filtrar) el líquido (Al_2O_3 disuelta) de los residuos de la bauxita (arenas y lodos rojos) por medio del desarenado, lavado y desecho de lodos rojos, antes de ser depositado en el precipitador.

4. Precipitación

Básicamente es lo opuesto a la extracción, salvo que aquí el producto puede ser controlado por medio de siembra de cristales de hidrato, generalmente fino y en cantidad controlada. Como por ejemplo el trihidrato de alúmina cristalino, denominado "hidrato", es precipitado a partir del licor del digestor:



Los cristales de hidrato son introducidos dentro de un horno rotativo para su calcinación.

5. Calcinación

El último paso es la calcinación en donde el hidrato se somete al secado y al calcinado. El secado se consigue aprovechando los gases calientes del

calcinador hasta secarlo y el calcinado se consigue a altas temperaturas (900-1200 °C) en un horno. De esta forma se obtiene el producto final, la alúmina (Al_2O_3). La reacción es la siguiente:

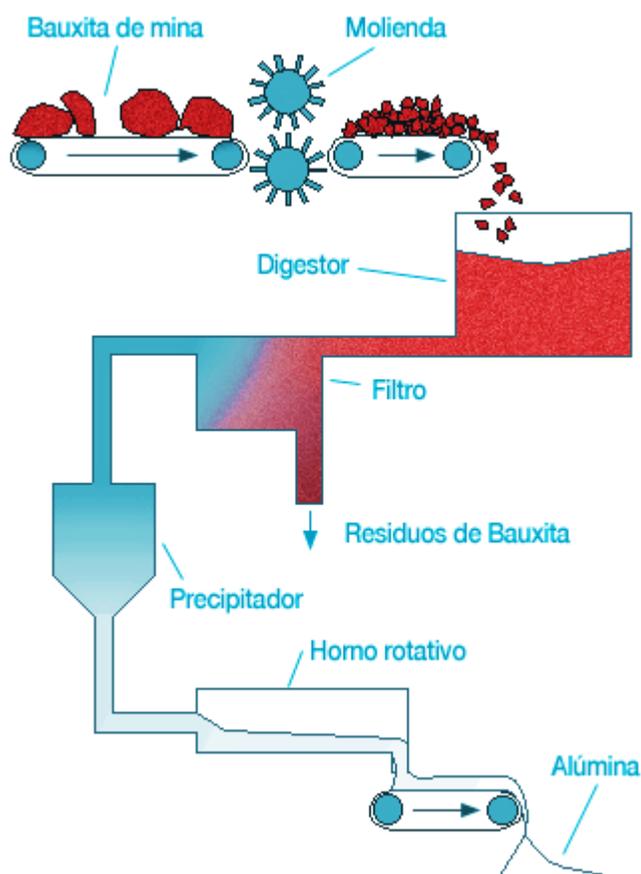


Figura 1. 1 Proceso Bayer (1).

El proceso Hall fue patentado por el inventor e ingeniero estadounidense Charles Hall en 1886, dicho proceso requiere de pasar una corriente eléctrica por un baño de alúmina disuelta en criolita para formarse un charco de aluminio en el fondo de la retorta. Este proceso, también conocido como reducción electrolítica consiste en: reducir y refinar la bauxita hasta crear polvo de alúmina, realizar una fundición en donde el polvo de alúmina se disuelve en un baño de criolita (Na_3AlF_6) contenida en recipientes (cubas) recubiertos de

carbono ≈ 1000 °C y utiliza corrientes eléctricas elevadas (200-350 kA) para separar el oxígeno de la alúmina; el aluminio fundido llega al fondo del baño de criolita y queda protegido de la oxidación en donde se enfriará y se le dará forma de lingote.

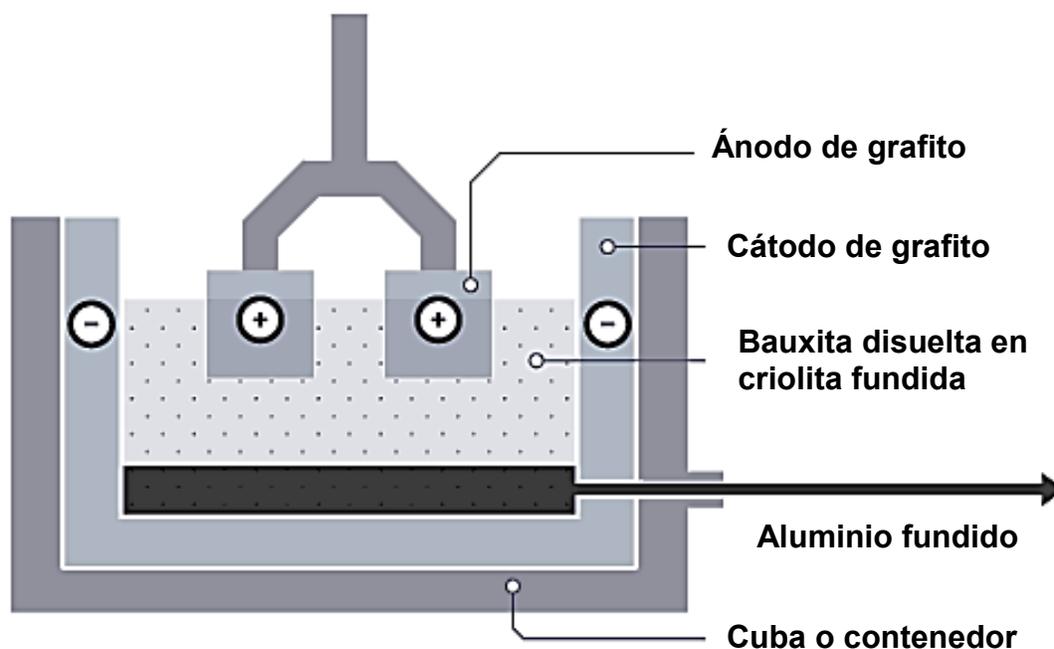


Figura 1. 2 Proceso Hall (51).

El metal puro resultante de estos procesos es relativamente débil y, como tal, raramente se utiliza en aplicaciones de construcción. Para incrementar su propiedad de resistencia mecánica, el aluminio puro es generalmente aleado con otros metales tales como cobre (Cu), manganeso (Mn), magnesio (Mg), silicio (Si) y zinc (Zn).

El aluminio y sus aleaciones han ido adquiriendo cada vez mayor importancia en las últimas décadas debido a sus excelentes propiedades y diversificada gama de aplicaciones. Las aleaciones de aluminio han sido reconocidas como una de las opciones más destacadas para diversas aplicaciones de los sectores industriales como: en la industria aeroespacial, en la construcción y primordialmente en la automotriz.

Actualmente, las aleaciones de aluminio para fundición más utilizadas son aquellas que contienen silicio para mayor fluidez y cobre para mejorar sus propiedades. Las cantidades de estos dos elementos pueden variar, de manera que el cobre predomina en algunas aleaciones (356) y el silicio en otras (319). En particular, las aleaciones Al+Si pueden ser vaciadas en una amplia gama de formas y espesores debido a su alta ductilidad y excelente fluidez al ser vaciadas. Motivos por los cuales hoy en día constituyen uno de los materiales más importantes dentro de la industria automotriz, ya que estas aleaciones se utilizan principalmente en la fabricación de cabezas y monoblocks para motores de combustión interna.

Las aleaciones de aluminio para forja más utilizadas son aquellas que contienen magnesio, las cuales corresponden a la serie 5XXX debido a que es un material no tratable térmicamente esto se traduce en un ahorro energético/económico. Las aleaciones aluminio-magnesio pueden mejorar sus propiedades mecánicas con ayuda de tratamientos de deformación y tratamientos térmicos logrando así escalas durezas de medias a altas, buena soldabilidad y buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos, encontrando su mayor aplicación en botes, barcos en tanques criogénicos.

Estas aleaciones exhiben una adecuada combinación de propiedades, tales como, alta resistencia y bajo peso, excelente conductividad térmica y eléctrica, bajo punto de fusión comparado con otros metales, buen acabado con superficies brillantes con poco o nada de manchas, resistencia a la corrosión y elevada resistencia al agrietamiento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Investigar la factibilidad del proceso de soldadura GMAW semiautomatizado y robotizado en la aleación de aluminio 5052-H32 para disminuir la porosidad.

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar un estudio del estado del arte del proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding) orientado a la aplicación de las aleaciones de aluminio 5052-H32 con metal de aporte ER4043.

1.3 Justificación

Una de las principales dificultades en cualquier proceso de soldadura es la poca información existente sobre los cambios microestructurales que determinan las propiedades mecánicas de la unión y que afectan al producto final. Debido a lo anterior, se requiere realizar un estudio bibliográfico sobre las variables involucradas en la selección del metal base, aporte y gas de protección que cumpla con los requerimientos de calidad de las uniones, conservándolas libres de discontinuidades que afectan la estructura de la unión.

1.4 Planteamiento del problema

La principal preocupación del sector metal-mecánico es elevar la eficiencia de los ensambles y disminuir los rechazos debido a la presencia de discontinuidades presentes en las soldaduras por arco, lo cual provoca pérdidas económicas.

Actualmente los procesos de manufactura se realizan de manera empírica al establecer las variables esenciales (velocidad de avance, voltaje y corriente) debido a que el error humano ocasiona un alto índice de rechazo. Para reducir este índice de rechazo, actualmente se están desarrollando nuevas tecnologías en procesos de arco automatizados, los cuales cumplen con las especificaciones de los estándares normalizados por la AWS (American Welding Society, por sus siglas en inglés) proporcionando uniones de alta calidad libres de discontinuidades.

1.5 Aportación tecnológica

Generar un documento a partir de información científica con la finalidad de aportar conocimiento metalúrgico adecuado para minimizar la presencia de discontinuidades (porosidad) en aleaciones de aluminio 5052-H32 incrementando la calidad en las uniones soldadas.

1.6 Alcances

Este trabajo se enfocará exclusivamente en la revisión del estado del arte del proceso de soldadura GMAW aplicado a aleaciones de aluminio, en particular a la aleación 5052-H32 sobre el comportamiento del porcentaje de porosidad generado mediante el uso de diferentes mezclas de gases.

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Fundamentos de la soldadura

La clasificación de los procesos de soldadura de acuerdo el Estándar Nacional Americano, ANS (American National Standard, por sus siglas en inglés) (2), se basa en la variación del grado de control de las actividades relacionadas con la soldadura que dependen de la interferencia humana/máquina y los procesos de soldadura son clasificados en manual, semiautomática, automática y robotizada (3). La clasificación de las actividades aplicadas sobre los procesos de soldadura se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Clasificación de las actividades aplicadas sobre los procesos de soldadura (4).

Actividades	Manual	Semi automático	Automático	Robotizado
Abertura y mantenimiento del arco eléctrico	Humano	Máquina	Máquina	Máquina (sensor)
Alimentación del alambre electrodo	Humano	Máquina	Máquina	Máquina
Control de la entrada de calor para obtener penetración	Humano	Humano	Máquina	Máquina (sensor)
Movimiento del arco en la unión	Humano	Humano	Máquina	Máquina (sensor)
Guiar el arco a lo largo de la unión	Humano	Humano	Máquina	Máquina (sensor)
Manipulación de la antorcha para direccionar el arco	Humano	Humano	Máquina	Máquina (sensor)
Corregir el arco para compensar desvíos	Humano	Humano	No ocurre	Máquina (sensor)

2.1.1 Clasificación de los procesos de soldadura

La clasificación de los procesos de soldadura es la siguiente: (2) (3)

Soldadura manual: soldadura con porta-electrodo sujetado y manipulado por el operador (ver Figura 2. 1) donde la calidad de la soldadura depende de sus habilidades y conocimientos.



Figura 2. 1 Soldadura manual (5).

Soldadura semiautomatizada: soldadura adaptada con equipo de control automático de una o más condiciones para su operación, donde el operador manipula la antorcha para realizar una soldadura mientras el electrodo es automáticamente alimentado por la máquina (ver Figura 2. 2).



Figura 2. 2 Máquina de soldadura con alimentador automático de electrodo (6).

Soldadura automatizada: soldadura adaptada con tecnología programable la cual requiere observación ocasional del proceso que no involucre ajuste manual en la interfaz de operación, donde la interacción máquina/operador es limitada (ver Figura 2. 3).

Soldadura robotizada: soldadura ejecutada y controlada por un equipo robotizado. Donde el operador tiene un papel activo en verificar el seguimiento de la trayectoria del cordón de soldadura (ver Figura 2. 3).



Figura 2. 3 Soldadura robótica automatizada (7).

2.1.2 Definición y clasificación del robot industrial

El término comúnmente aceptado a nivel mundial es otorgado por la *Asociación de Industrias Robóticas (RIA, por sus siglas en inglés)*, la cual estipula que: “un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos electromecánicos, según trayectorias variables (cambios de pendiente o desplazamientos) programadas para realizar tareas diversas” (8).

Actualmente, las principales ventajas al utilizar los robots son:

- Mejora de condiciones de trabajo y aporta protección a los operadores frente a ambientes hostiles y trabajos peligrosos.
- Reducción de costos.
- Puede proveer repetitividad y aumento de la producción en la industria sin pérdidas por paros.
- Mejoramiento de la calidad en la producción.

En la Figura 2. 4 se puede observar ejemplos de los tipos de robots, que según la AFRI (Asociación Francesa de Robótica Industrial, por sus siglas en inglés) los clasifica de la siguiente manera: (8)

- TIPO A) Control manual: son controlados por control manual.
- TIPO B) Control automático: son manipulados automáticamente con ciclos preajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
- TIPO C) Programables o de trayectoria continua: robot programable con trayectoria continua o punto a punto para realizar una tarea específica. Carece de conocimientos sobre su entorno.
- TIPO D): Robot capaz de adquirir datos de su entorno readaptando su tarea en función de éstos.

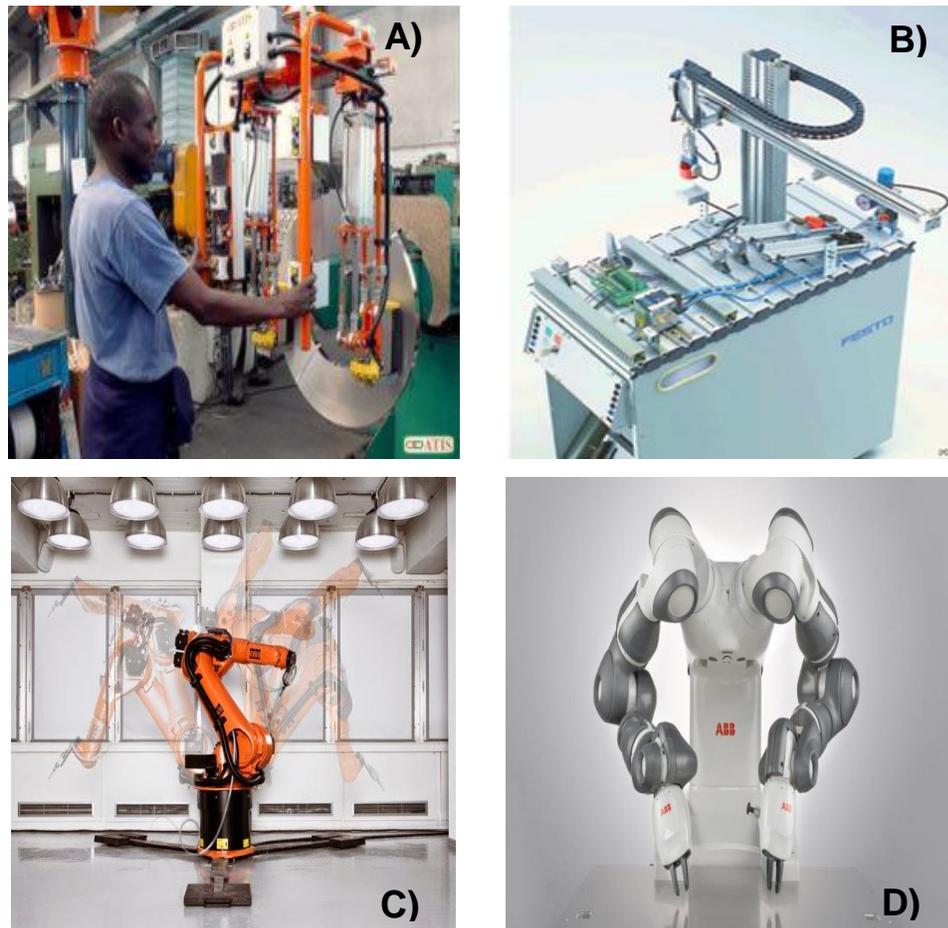


Figura 2. 4 Diferentes tipos de robots A) Robot con control manual (9), B) Robot con control automático (10), C) Robot programable (11) y D) Robot que se adapta al entorno de trabajo (12).

Otra clasificación de los robots industriales es la basada en generaciones la cual es más simple y específica: (8)

- Primera generación: repite la tarea programada secuencialmente; no toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.
- Segunda generación: Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia adaptando sus movimientos para localizar, clasificar y detectar.

- Tercera generación: Su programación se realiza mediante el uso de un lenguaje; posee capacidad para la planificación automática de tareas, adquisición y análisis de información del entorno de trabajo.
- Cuarta generación: Robots inteligentes integrados con componentes sensoriales que brindan la capacidad de ejecutar algoritmos complejos y de adaptarse al entorno mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial.

2.1.3 Elementos de robots

1. Estructura mecánica.

Se encarga de dar soporte y capacidad de movimiento al robot. Un robot está formado por una cadena de eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento entre cada dos eslabones cercanos como se puede observar en la Figura 2. 5 (8) (13).

- Los eslabones son los miembros estructurales sólidos de un robot.
- Las articulaciones son los acoplamientos móviles entre los eslabones.

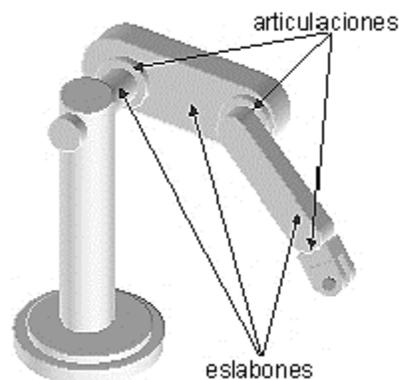


Figura 2. 5 Ilustración de la estructura mecánica de un robot (14).

2. Sistema de transmisión:

Son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Los reductores son los encargados de adaptar el par (torque) y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot (8) (13).

3. Sistema de accionamiento:

Lo componen los actuadores que son los encargados de producir el movimiento. Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía neumática, hidráulica y eléctrica, como por ejemplo la Figura 2. 6. Entre las características a considerar para seleccionar un actuador se encuentran: potencia, control, peso, volumen, precisión, velocidad, mantenimiento y costo (8) (13).



Figura 2. 6 Actuador eléctrico (15).

4. Sistema sensorial:

El sistema suministra información para efectuar las acciones correspondientes a las tareas como: localización (como por ejemplo la Figura 2.

7), sujeción, transporte, ensambles, descarga de piezas, maquinado, soldadura, entre otras (13).



Figura 2. 7 Sensor de posición lineal sin contacto. (16)

5. Sistema de control:

Analiza los datos que provee el sistema sensorial y envía las instrucciones a los actuadores y al efector final (ver en la Figura 2. 8) (8) (13).



Figura 2. 8 Unidad de control KR C2.

6. Efector final:

Son los elementos físicos a través de los cuales el robot interactúa con su entorno. Los efectores finales se pueden clasificar en elementos de sujeción y

herramientales. Los elementos de sujeción comúnmente llamados pinzas, se utilizan para sujetar los objetos. Cuando se requiere realizar un tipo de actividad específica es necesario el uso de una herramienta adecuada, la cual puede ser: pinza de soldadura por puntos, antorcha de soldadura por arco eléctrico (ver Figura 2. 9) y adaptador para tareas de maquinado, pintura y pulido (8) (13).



Figura 2. 9 Antorcha de soldadura por arco eléctrico (17).

Estas aplicaciones están siendo implementadas en robots marca FANUC[®], ABB[®], MOTOMAN[®], KAWASAKI[®] y KUKA[®].

2.1.4 Generalidades del robot KUKA KR16-2

El robot KUKA es un brazo robótico que cuenta con diferentes modelos como se puede observar en la Tabla 2. El modelo KR16-2 cuenta con: 6 articulaciones (grados de libertad), soporta una carga nominal de 16 kg, cuenta con un área de trabajo de 1.6 m y su unidad de control es un KRC2 edición 2005. Los motores de accionamiento son servomotores de corriente alterna (CA), con conectores libres de mantenimiento y asegurados contra sobrecargas. El servicio de mantenimiento preventivo es mínimo y sencillo. La vida útil promedio del robot es de 10 y 15 años, según la aplicación y entorno (18).

Tabla 2 Tipos de KR 16 y sus diferencias (19).

KR16-2	KR16 L6-2	KR16 L8 arc HW	KR16 arc HW
Carga nominal de 16 kg.	Carga nominal de 6 kg.	Carga nominal de 8 kg.	Carga nominal de 16 kg.
Área de trabajo de 1.6 m.	Área de trabajo de 1.9 m.	Área de trabajo de 2 m.	Área de trabajo de 1.6 m.

Los HW son aberturas de 50-58 mm que los robots KUKA tienen entre el brazo y la muñeca, dicha abertura permite una instalación protegida del paquete de tubos para la soldadura por arco en el brazo.

2.1.5 Mecánica del robot

Las partes de las cuales se compone el robot industrial KUKA KR16 pueden ser apreciadas en la Figura 2. 10. Figura 2. 10 Partes de brazo robótico industrial KUKA KR16

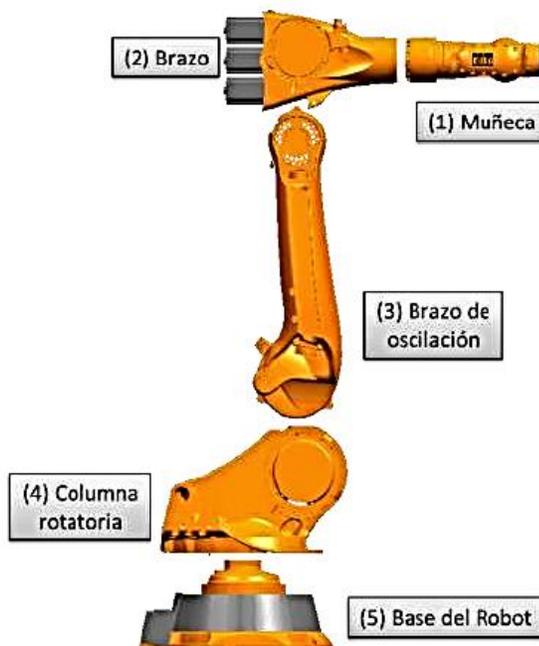


Figura 2. 10 Partes de brazo robótico industrial KUKA KR16 (18).

Las posibilidades de los movimientos de cada uno de los ejes del robot pueden verse en la Figura 2. 11.

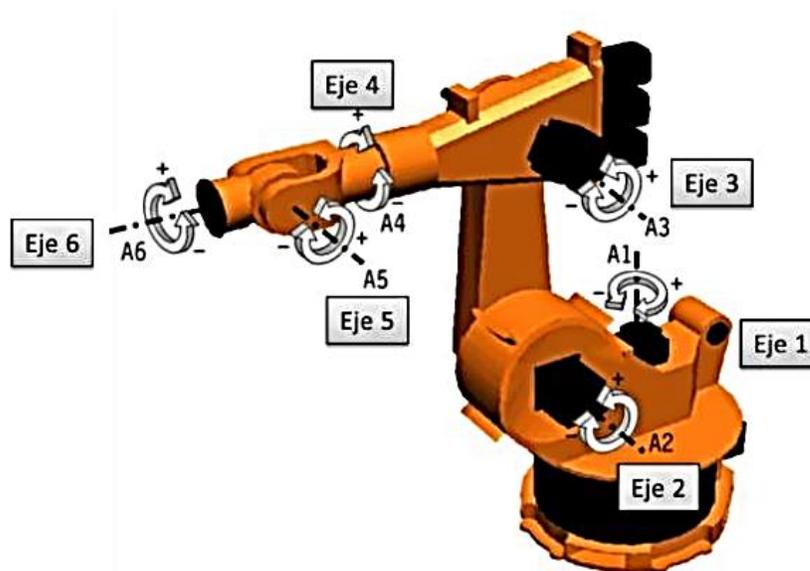


Figura 2. 11 Desplazamiento específico de cada uno de los ejes A1 - A6 (18).

El campo de trabajo debe protegerse con dispositivos de seguridad como: una puerta de protección, vallas de seguridad, barreras, cortinas fotoeléctricas, etc (20).

2.1.6 Generalidades de la soldadura por arco de metal y gas

La soldadura de arco es el proceso de más amplia aceptación, el más económico y el más práctico para unir metales. En el proceso manual de soldadura por arco que es de uso más común, el soldador utiliza un electrodo adecuado, un cable de tierra aterrizado a la pieza y un valor apropiado de corriente eléctrica que interactúa entre el electrodo y el metal. La antorcha junto con el electrodo es manipulado por el soldador a lo largo de las líneas de unión del metal a soldar, dando suficiente tiempo para que el calor de entrada del arco funda el metal base. El metal fundido, procedente del electrodo o metal de

aporte, se deposita en la unión y junto con el metal base de los bordes, se solidifica para formar una unión sólida (21).

Existen varios procedimientos de soldadura por arco como se puede observar en la Figura 2. 12. La soldadura por arco de carbón es la primera técnica moderna de soldadura. En este proceso se establece un arco entre un electrodo de carbón puro y la pieza de trabajo conectada a tierra, o entre dos electrodos de carbón que casi se unen cerca de la superficie a soldar. Los electrodos de carbón no se consumen en el proceso. Si se necesita metal de aporte para realizar la soldadura, deben usarse electrodos metálicos para soldar. En la actualidad, el proceso por arco de carbón se aplica principalmente para cortar o ranurar metales (21).

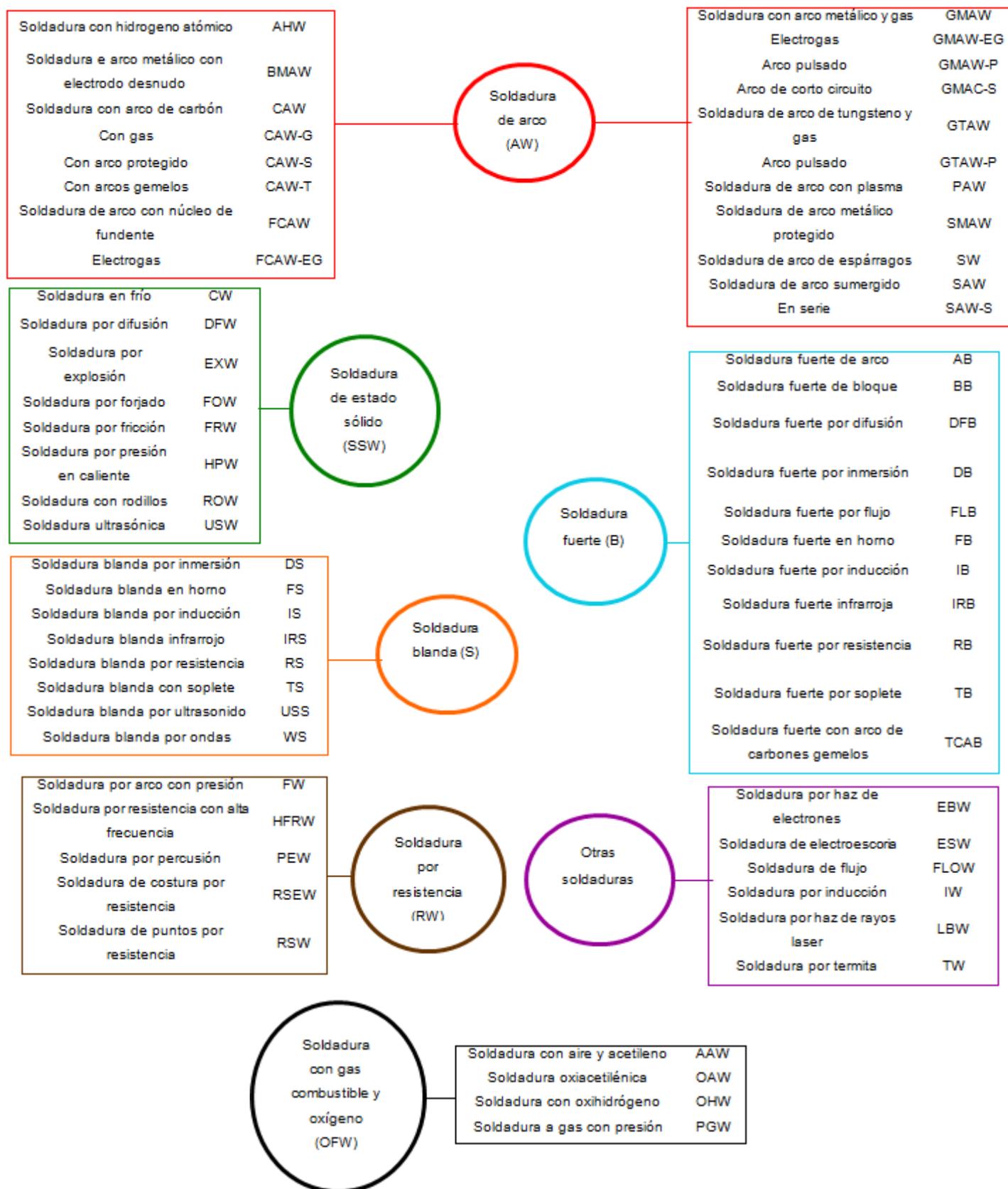


Figura 2. 12 Diagrama maestro de los procesos de soldadura (21).

Al proceso de arco de carbón le siguió rápidamente el desarrollo de la soldadura por arco metálico, en el cual se utilizaba una varilla de metal consumible como electrodo. Al principio los electrodos eran varillas metálicas desnudas y esto causaba problemas significativos para la estabilización del arco. El desarrollo de los recubrimientos en los electrodos, resolvió en gran parte los problemas de estabilización del arco y condujo a lo que se conoce como soldadura de arco metálico protegido (SMAW por sus siglas en inglés) que es el proceso eléctrico de utilización más amplia a nivel industrial. Al calentarse el electrodo el recubrimiento se evapora formando una barrera protectora alrededor del arco y la soldadura. El gas protector impide que el oxígeno y el nitrógeno del aire formen con el metal soldado óxidos y nitruros. El desarrollo del proceso manual SMAW pronto se aplicó a las máquinas soldadoras semiautomáticas y automáticas lo que condujo a la soldadura de arco con atmósfera protectora de gas (GMAW por sus siglas en inglés) (21).

El proceso de soldadura GMAW emplea un arco eléctrico entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura protegido por un gas el cual puede ser reactivo o inerte y/o una mezcla de ambos, por ejemplo, el CO_2 . El gas se suministra externamente y sin aplicación de presión, como en el caso del proceso de fricción-agitación (FSW por sus siglas en inglés) por nombrar un ejemplo. La aplicación primaria del proceso GMAW fue orientada hacia la soldabilidad del aluminio. Por lo anterior, se acuñó el término metal protegido por gas inerte (MIG por sus siglas en inglés) y actualmente algunos aún lo usan para referirse al proceso GMAW (22).

El proceso GMAW puede operar en las modalidades, semiautomática, automática o robotizada. Todos los metales de importancia comercial, como el acero al carbono, acero de alta resistencia baja aleación mecánica (HSLA), acero inoxidable, aluminio, cobre, titanio y las aleaciones de níquel se pueden soldar en cualquier posición con este proceso teniendo en cuenta la experiencia

del inspector certificado de soldadura (CWI por sus siglas en inglés) al escoger el gas protector, el electrodo y las variables de soldadura apropiadas (23).

2.2 El Proceso GMAW

2.2.1 Fundamentos

2.2.1.1 Introducción

El proceso de soldadura GMAW utiliza un arco entre el electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura aplicando gas de protección suministrado externamente y sin aplicación de presión (21).

En un principio se le consideraba básicamente un proceso que utiliza un electrodo de metal desnudo de diámetro pequeño con alta densidad de corriente que empleaba un gas inerte para proteger el arco. Entre los avances posteriores del proceso están la operación de bajas corrientes y corrientes continuas a pulsos, la aplicación a una gama más amplia de materiales y el empleo de gases y mezclas de gases reactivos (sobre todo CO₂). Este último avance condujo a la aceptación formal del término soldadura por arco de metal y gas (GMAW), ya que usan gases inertes como reactivos (21).

Una variación del proceso GMAW que emplea un electrodo tubular dentro del cual hay un núcleo fundente constituido principalmente por polvos metálicos es el FCAW (Fluxe Core Arc Welding por sus siglas en inglés). Estos electrodos requieren de un escudo de gas para proteger el charco de soldadura de contaminaciones por parte de la atmósfera (21).

La Sociedad Americana de Soldadura (AWS por sus siglas en inglés) considera los electrodos con núcleo de metal como una alternativa del proceso GMAW (23).

2.2.1.2 Ventajas

Las ventajas más importantes de este proceso son las siguientes: (23)

1. Es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
2. El proceso GMAW no tiene limitantes sobre el tamaño del electrodo.
3. Puede soldarse en todas las posiciones, algo que no es posible con la SAW (Submerged Arc Welding por sus siglas en inglés).
4. Se logran tasas de deposición más altas que con SMAW.
5. Las velocidades de soldadura en el proceso GMAW son más altas que con SMAW.
6. La alimentación del electrodo es continua, gracias a eso es posible depositar soldaduras con mayores longitudes sin parar.
7. Cuando se usa transferencia por spray, es posible lograr mayor penetración que con SMAW, lo que puede permitir el uso de soldaduras de filete más pequeñas para obtener una mayor resistencia mecánica.
8. Requiere una mínima limpieza antes y después de realizar la soldadura para que se produzca el mínimo de escoria.

2.2.1.3 Limitaciones

Como en cualquier proceso de soldadura, el proceso GMAW tiene ciertas limitaciones entre ellas están las siguientes: (23)

1. El equipo de soldadura es más complejo, más costoso y menos portátil que el proceso SMAW.
2. Es difícil soldar geometrías complejas de difícil acceso debido a que la pistola de soldadura es más grande que la geometría a soldar.
3. En la práctica no se recomienda el uso de este proceso en lugares abiertos ya que las corrientes de aire dispersan el gas protector.

Estas ventajas y limitaciones hacen del proceso de soldadura GMAW ideal para aplicaciones de altas tasas de volumen de producción siempre y cuando se tengan las recomendaciones según el código AWS D1.2 (23), (24), (25).

2.2.1.4 Principios de operación

El proceso GMAW se basa en la alimentación continua de un electrodo adecuado consumible protegido por un gas inerte/reactivo que se aplica externamente. El soldador utiliza un cable de tierra el cual aterriza a la pieza y ajusta la corriente eléctrica para crear una corriente intensa que interactúe entre el electrodo y el metal. Enseguida, la antorcha junto con el electrodo es manipulado por el soldador a lo largo de las líneas de unión del metal a soldar, dando suficiente tiempo para que el calor de entrada del arco funda el metal base y se solidifique para formar el cordón de soldadura. El proceso se ilustra en la Figura 2. 13 (22), (23).

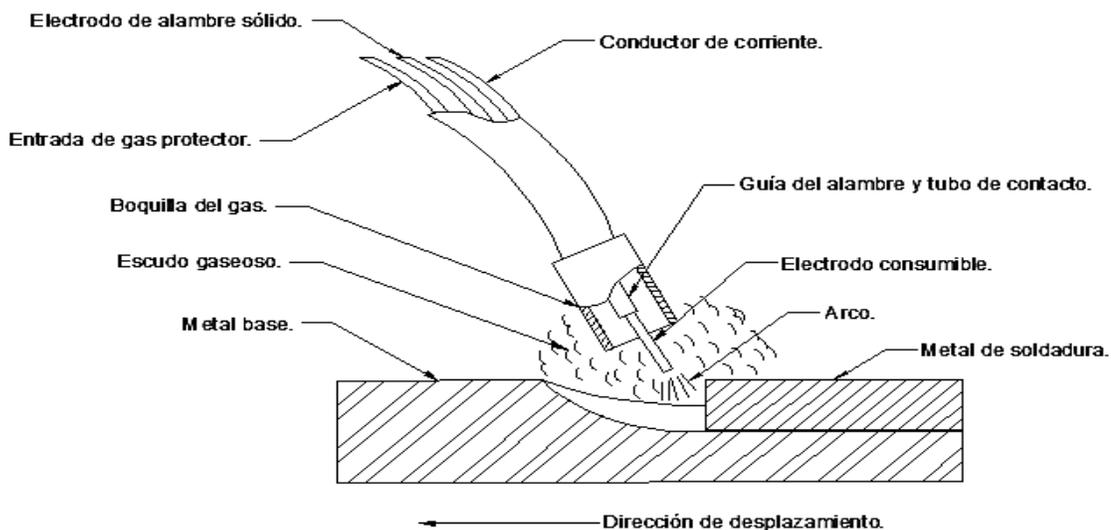


Figura 2. 13 Proceso de soldadura GMAW (23).

Una vez que el operador ha hecho los ajustes iniciales, el equipo puede regular automáticamente los parámetros eléctricos del arco. Los únicos controles manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad y dirección de desplazamiento, así como el posicionamiento de la pistola. Cuando se cuenta con el equipo y los ajustes de los parámetros eléctricos apropiados, la longitud del arco y la corriente (es decir, la velocidad de alimentación del electrodo) se mantienen automáticamente constantes. El equipo necesario para el proceso GMAW se muestra en la Figura 2. 14 (22) (23).

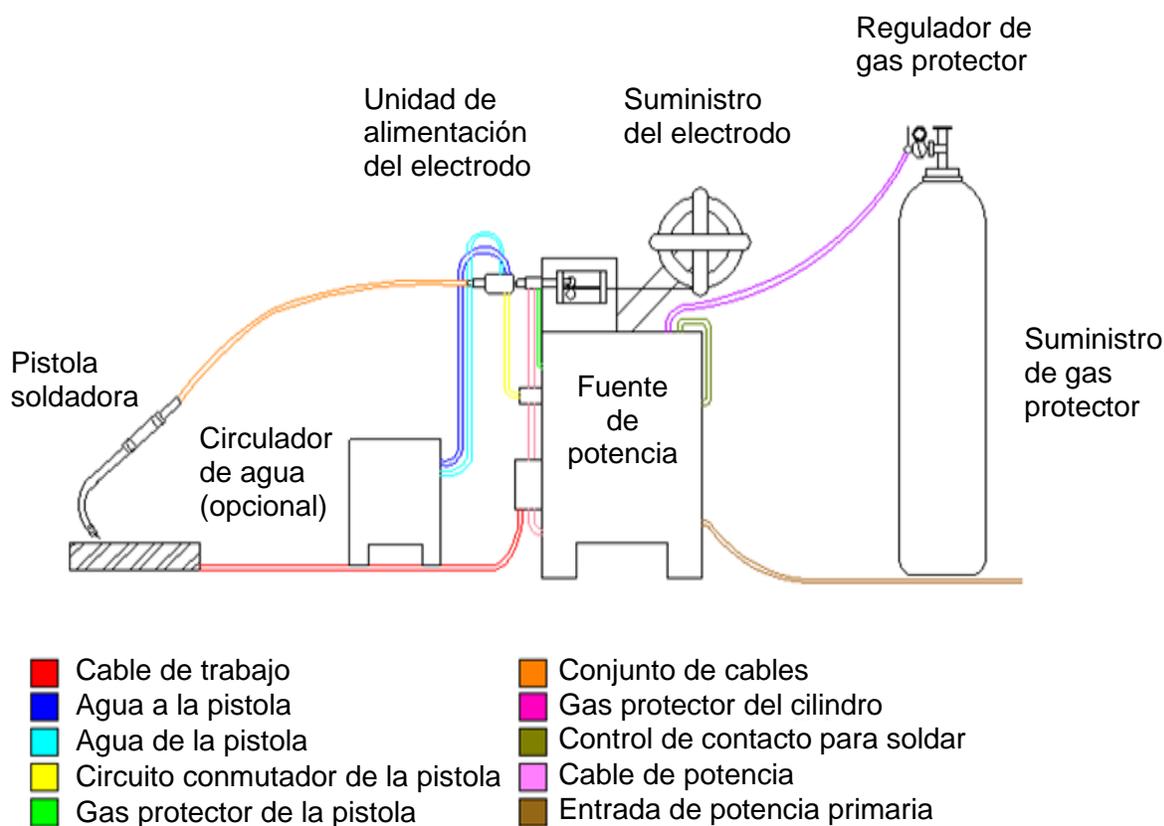


Figura 2. 14 Esquema representativo del equipo para soldadura por arco GMAW (23).

Los componentes básicos del equipo son la pieza de trabajo, pistola soldadora, unidad de alimentación del electrodo, suministro de electrodo (carrete), tanque regulador de gas protector, fuente de potencia y cables y mangueras (22) (23).

2.2.1.5 Modos de transferencia en el proceso GMAW

El modo de transferencia depende de la magnitud de corriente utilizada durante el proceso de soldadura GMAW, bajo esta condición se logran diferentes modos generales de transferencia, los cuales son: (22) (23)

1. Transferencia en cortocircuito.
2. Transferencia globular.
3. Transferencia por spray.

A su vez, el modo de transferencia está sujeto a determinados parámetros:

1. Magnitud y tipo de la corriente (CC o CA).
2. Diámetro del electrodo.
3. Composición química del electrodo.
4. Distancia entre el electrodo y la pistola.
5. Gas protector.

2.2.1.6 Transferencia en cortocircuito

Este tipo de transferencia utiliza corrientes bajas y electrodos de diámetros pequeños donde el tamaño de la gota es mayor que el diámetro del electrodo. La transferencia en cortocircuito provoca un charco de soldadura pequeño, de rápida solidificación y que es usado para unir secciones delgadas. El electrodo se transfiere a la pieza de trabajo durante el contacto del metal base generando un charco de soldadura de 20 a más de 200 gotas por segundo (22) (23).

La composición del gas protector tiene un efecto importante y los cambios de dicha composición pueden afectar notablemente el tamaño de las gotas y la intensidad del modo de transferencia en cortocircuito. El CO₂ generalmente

produce niveles de salpicadura elevados en comparación con los gases inertes argón y helio, promoviendo una alta tasa de deposición y penetración. Por ejemplo, para obtener un punto medio entre salpicadura y buena penetración se usan mezclas de CO₂ y argón al soldar aceros al carbono y de baja aleación. Si agregamos helio al argón incrementa la penetración en metales no ferrosos como las aleaciones de aluminio (22) (23).

2.2.1.7 Transferencia globular

Con corriente continua electrodo positivo (CCEP) hay transferencia globular cuando la corriente es baja, sea cual sea el gas protector utilizado. La transferencia globular se caracteriza por un tamaño de gota mayor que el diámetro del electrodo en donde la gravedad actúa fácilmente sobre esa gota. Si el arco es corto provocará una gran cantidad de salpicaduras. Para evitarlo, el arco debe tener una distancia entre el electrodo y la pistola suficiente para asegurar que la gota caiga por acción de la gravedad antes de que haga contacto con el charco de soldadura. Sin embargo, cuando se emplea un voltaje elevado se produce una falta de fusión y una penetración insuficiente. Debido a esto, el modo de transferencia globular no se utiliza a nivel industrial (22) (23).

2.2.1.8 Transferencia por spray

Con un gas de protección rico en argón es posible producir la transferencia por spray estable y libre de salpicaduras. La gota de soldadura (tensión superficial) que se desprende de la punta del electrodo está relacionada de la corriente y el tamaño del diámetro del electrodo los cuales son inversamente proporcionales. Por ejemplo, en la Tabla 3 se pueden observar diferentes diámetros de electrodos y la corriente mínima (I_{mi}) que se necesita para generar el calor suficiente para producir así gotas con tensión superficial capaces de mantener su forma hasta llegar al charco de soldadura (22) (23).

Tabla 3 Corrientes de transición de globular a spray para diversos electrodos (23).

Tipo de electrodo de alambre	Diámetro del electrodo		Gas protector	Corriente mínima (Imi)*, A
	<i>pulg</i>	<i>mm</i>		
Acero dulce (bajo carbono)	0.030	0.8	98 % Argón, 2 % Oxígeno	150
Acero dulce (bajo carbono)	0.035	0.9	98 % Argón, 2 % Oxígeno	165
Acero dulce (bajo carbono)	0.045	1.1	98 % Argón, 2 % Oxígeno	220
Acero dulce (bajo carbono)	0.062	1.6	98 % Argón, 2 % Oxígeno	275
Acero inoxidable	0.035	0.9	98 % Argón, 2 % Oxígeno	170
Acero inoxidable	0.045	1.1	98 % Argón, 2 % Oxígeno	225
Acero inoxidable	0.062	1.6	98 % Argón, 2 % Oxígeno	285
Aluminio	0.030	0.8	Argón	95
Aluminio	0.045	1.1	Argón	135
Aluminio	0.062	1.6	Argón	180
Cobre desoxidado	0.035	0.9	Argón	180
Cobre desoxidado	0.045	1.1	Argón	210
Cobre desoxidado	0.062	1.6	Argón	310
Bronce al silicio	0.035	0.9	Argón	165
Bronce al silicio	0.045	1.1	Argón	205
Bronce al silicio	0.062	1.6	Argón	270

*Imi: Corriente mínima.

La transferencia por spray puede ser usado para soldar cualquier material o aleación en cualquier posición, produce un flujo altamente direccional de gotas que alcanzan velocidades que vencen a la gravedad y produce pocas salpicaduras. Sin embargo, puede ser difícil aplicar el proceso a láminas

delgadas por las corrientes tan altas que se necesitan para producir el arco de spray provocando la perforación de las láminas relativamente delgadas en vez de soldarlas. Además, la alta tasa de deposición produce un charco de soldadura demasiado grande lo cual afecta la solidificación del cordón en la unión, ya sea cuando se suelda en posición vertical o sobre cabeza. Una alternativa que se está utilizando en la actualidad es la implementación del modo de transferencia P-GMAW, el cual controla cuidadosamente ondas y frecuencias al aplicar la soldadura. Como se puede observar en la Figura 2. 15, se suministran dos niveles de corriente; una corriente base (IB) cuyo objetivo es mantener el arco sin proporcionar energía suficiente para hacer que se formen gotas en la punta del electrodo, y una corriente pico (IP) cuya amplitud es mayor que la corriente media (I_m) la cual es necesaria para generar el pulso (P-GMAW) provocando así la transferencia de una o más gotas hacia el metal base (22) (23).

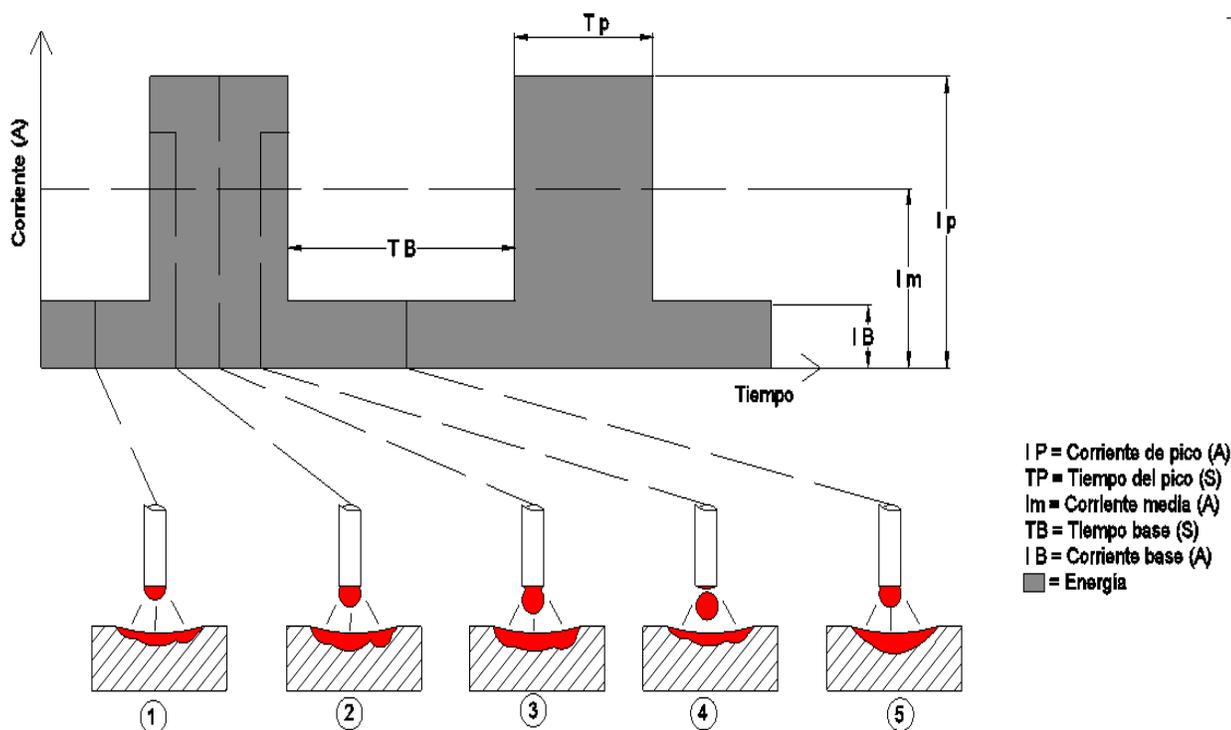


Figura 2. 15 Característica de corriente de soldadura de arco de spray a pulsos (23).

2.2.1.9 Variables del proceso

Las variables del proceso afectan en la penetración de la soldadura, la geometría del cordón y en la calidad de la soldadura, de los cuales son: (22)
(23)

1. Corriente de soldadura (velocidad de alimentación del electrodo).
2. Polaridad.
3. Voltaje de arco (longitud del arco).
4. Velocidad de recorrido.
5. Distancia entre el electrodo y la pistola.
6. Orientación del electrodo (ángulo respecto a la dirección de desplazamiento).
7. Posición de la unión que se va a soldar.
8. Diámetro del electrodo.
9. Composición y tasa de flujo del gas protector.

Para obtener soldaduras de buena calidad es necesario tener un conocimiento y un control de estas, pero al modificar una variable casi siempre se tendrá que modificar una o más variables para obtener los resultados que se buscan (23).

2.2.1.10 Polaridad

La polaridad es la conexión eléctrica de la pistola soldadora con las terminales de la fuente de potencia de corriente continua. Si el cable de la pistola se conecta a la terminal positiva, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo positivo (CCEP), conocida como polaridad inversa. Cuando el cable de la pistola se conecta a la terminal negativa, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo negativo (CCEN), conocido como polaridad directa. En el proceso de GMAW se utiliza más la corriente

continua con el electrodo positivo (CCEP) debido a que produce un arco estable, una transferencia de metal uniforme, pocas salpicaduras, buenas características de la franja de soldadura y profundidad máxima de penetración (23).

La corriente continua con el electrodo negativo (CCEN) se utiliza raras veces pero solo para aplicaciones de recubrimiento ya que aporta altas tasas de deposición y menor penetración (23).

2.2.1.11 Distancia entre el electrodo y la pistola

La extensión del electrodo o la distancia entre el electrodo y la pistola puede observarse en la Figura 2. 17. Un aumento en la distancia entre el electrodo y la pistola produce un incremento en su resistencia eléctrica. El calentamiento por su resistencia, a su vez, hace que se eleve la temperatura del electrodo, lo que aumenta ligeramente la tasa de fusión del electrodo (23).

La extensión de electrodo generalmente está entre 6 mm y 3 mm (0.236 pulg y 0.125 pulg) para la transferencia en cortocircuito y entre 13 mm y 25 mm (0.511 pulg y 0.984 pulg) para las demás transferencias de metal (23).

2.2.1.12 Orientación del electrodo

Como en todos los procesos de soldadura por arco, la orientación del electrodo afecta la forma y la penetración del cordón de soldadura. Cuando el electrodo apunta en dirección opuesta al desplazamiento, la técnica se denomina *revés* o *arrastre*. Cuando el electrodo apunta en dirección del desplazamiento, la técnica se denomina *derecha* o *ataque*. Estas técnicas se pueden observar en la Figura 2. 16 (23).

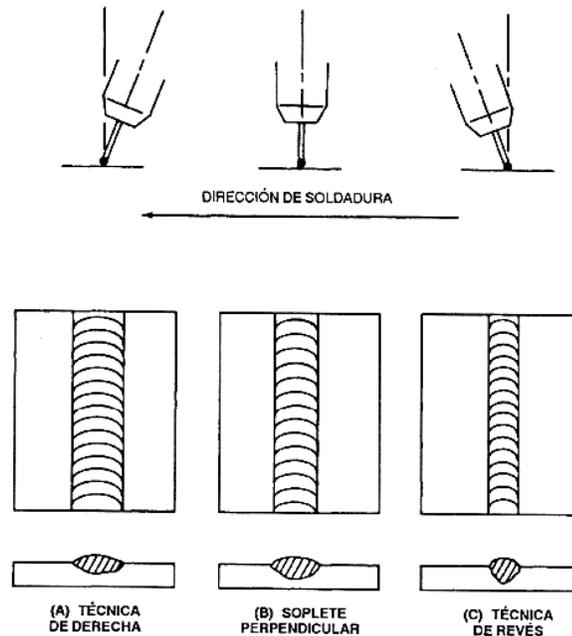


Figura 2. 16 Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura (23).

2.2.1.13 Posición de la unión por soldar

Casi todos los modos de transferencia del proceso GMAW se pueden usar en las posiciones plana u horizontal, pero el pulsado y el cortocircuito se pueden utilizar todas las posiciones (23).

2.2.1.14 Tamaño del electrodo

El tamaño del electrodo afecta al cordón de soldadura, un electrodo de mayor tamaño requiere de una corriente más alta que un electrodo pequeño y las corrientes altas producen mayor fusión del electrodo, altas tasas de deposición y mayor penetración (23).

2.2.1.14.1 Metales de aporte para aleaciones de aluminio

El aluminio es el segundo en importancia de los metales fabricados. Se le aplican en gran medida las soldaduras por los procesos de arco GMAW y de

tungsteno y gas (GTAW, por sus siglas inglés). A causa de la operabilidad relativamente deficiente y la necesidad de la completa eliminación del fundente después de aplicada la soldadura, raras veces se emplean varillas de aporte recubiertas para soldar el aluminio. Los metales de aporte que se han encontrado adecuados para la soldadura de arco de uso general, con diversas combinaciones aparecen en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 (21) (22) (23).

Los tamaños normales de electrodos desnudos de soldadura de aluminio que se venden en carretes, son 0.030, 0.046, 0.062, 0.093 y 0.125 de pulgada. Estos se obtienen en carretes de 10, 12 ½ y 15 libras. Los alambres de diámetro hasta de 0.062 de pulgada se obtienen también en carretes de una libra. Las varillas desnudas de soldadura en tramos rectos y en espiras se surten en diámetros de 0.062, 0.093, 0.125, 0.156, 0.187 y 0.25 de pulgada. La varilla de aluminio de longitud estándar es de 36 pulgadas y el paquete más común contiene 5 libras. Se obtienen otras longitudes y tamaños de paquetes los cuales son descritos en la especificación AWS A5.10-69. Los electrodos de aluminio recubiertos que se usan para soldadura de aluminio con arco son ya sea de 14 pulgadas de largo con diámetros de 0.093, 0.125, 0.156, 0.187 y 0.25 de pulgada; o bien, de 18 pulgadas de largo en diámetros de 0.312 y 0.375 de pulgada. Los paquetes normales contienen 1, 5 o 10 libras y en esta forma se comercializa (21) (22) (23).

Tabla 4 Metales de aporte que se usan comúnmente en las combinaciones de soldadura de arco de las aleaciones de aluminio (21) (26).

Aleaciones que han de soldarse	Ductilidad						Resistencia de la unión soldada (ya soldada)						Resistencia a la corrosión					
	1100	4043	5654	5356	5554	5556	1100	4043	5654	5356	5554	5556	1100	4043	5654	5356	5554	5556
Para soldar la aleación 1100 a:																		
1100	A	D	-	B	-	C	B	A	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
3003, alclad 3003	A	D	-	B	-	C	B	A	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
3004, alclad 3004	A	D	-	B	-	C	B	A	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
5005, 5050	A	D	-	B	-	C	B	A	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
5052, 5154, 5454	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5083, 5086, 5456	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6063, 6101	-	C	-	A	-	B	-	A	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
6061	-	C	-	A	-	B	-	A	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
Para soldar la aleación 3003 a:																		
3003, alclad 3003	A	D	-	B	-	C	C	B	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
3004, alclad 3004	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	A	-	-	-	-
5005, 5050	A	D	-	B	-	C	C	B	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
5052	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	A	-	-	-	-
5154	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	C	A	B	A	B
5454	-	C	-	A	A	B	-	B	-	A	A	A	-	C	-	B	A	B
5083, 5086, 5456	-	C	-	A	-	B	-	A	-	A	-	A	-	B	-	A	-	A
6063, 6101	-	C	-	A	-	B	-	B-	-	A	-	A	-	A	-	-	-	-

6061		C	-	A	-	B	-	B-	-	A	-	A	-	A	-	-	-	-
Para soldar alclad 3003 a:																		
Alclad 3003	A	D	-	B	-	C	C	B	-	A	-	A	A	A	-	B	-	B
3004, alclad 3004	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	A	-	B	-	B
5005, 5050	A	D	-	B	-	C	C	B	-	A	-	A	A	A	-	B	-	B
5052	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	A	-	B	-	B
5154	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	C	A	B	A	B
5454	-	C	-	A	A	B	-	B	-	A	A	A	-	C	-	B	A	B
5083,5086, 5456	-	C	-	A	-	B	-	A	-	A	-	A	-	B	-	A	-	A
6063, 6101	-	C	-	A	-	B	-	B-	-	A	-	A	-	A	-	B	-	B
6061		C	-	A	-	B	-	B-	-	A	-	A	-	A	-	B	-	B
Para soldar la aleación 3004 a:																		
3004, alclad 3004	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	A	B	-	B	-
5005, 5050	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	A	-	-	-	-
5052	-	C	-	A	-	B	-	C	-	B	-	A	-	A	-	-	-	-
5154	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	C	A	B	A	B
5454	-	C	-	A	A	B	-	D	-	B	C	A	-	C	-	B	A	B
5083,5086, 5456	-	C	-	A	-	B	-	C	-	B	-	A	-	B	-	A	-	A
6063, 6101	-	C	-	A	-	B	-	C	-	B	-	A	-	A	-	-	-	-
6061	-	C	-	A	-	B	-	C	-	B	-	A	-	A	-	-	-	-
Para soldar alclad 3004 a:																		
Alclad 3004	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	A	B	C	B	C
5005, 5050	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	A	-	B	-	B
5052	-	C	-	A	-	B	-	C	-	B	-	A	-	A	-	B	-	B
5154	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	C	A	B	A	B
5454	-	C	-	A	A	B	-	D	-	B	C	A	-	C	-	B	A	B
5083,5086, 5456	-	C	-	A	-	B	-	C	-	B	-	A	-	B	-	A	-	A

6063, 6101	-	C	-	A	-	B	-	C	-	B	-	A	-	A	-	B	-	B
6061	-	C	-	A	-	B	-	C	-	B	-	A	-	A	-	B	-	B
Para soldar la aleación 5005 o la 5050 a:																		
5005, 5050	A	D	-	B	-	C	-	B	-	A	-	A	A	A	-	-	-	-
5052	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	A	A	-	A	-	-	-	-
5154	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	C	A	B	A	B
5454	-	C	-	A	A	B	-	B	-	A	-	A	-	C	-	B	A	B
5083,5086, 5456	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	B	-	A	-	A
6063, 6101	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	A	-	-	-	-
6061	-	C	-	A	-	B	-	B	-	A	-	A	-	A	-	-	-	-
Para soldar la aleación 5052 a:																		
5052	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	C	B	-	B	-
5154	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	C	A	B	A	B
5454	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	C	B	B	A	B
5083,5086, 5456	-	-	-	A	-	B	-	-	-	B	-	A	-	-	-	A	-	A
6063, 6101	-	A	-	-	A	-	-	B	A	A	A	A	-	A	B	-	B	-
6061	-	A	-	-	A	-	-	D	C	B	C	A	-	A	B	-	B	-
Para soldar a la aleación 5083 o la 5456 a:																		
5154	-	-	A	A	A	B	-	-	C	B	C	A	-	-	A	A	A	A
5454	-	-	-	A	A	B	-	-	-	B	C	A	-	-	-	B	A	B
5083,5086, 5456	-	-	-	A	-	B	-	-	-	B	-	A	-	-	-	A	-	A
6063, 6101	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	A	A	A	A	A
6061	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	A	A	A	A	A
Para soldar la aleación 5086 a:																		
5154	-	-	A	A	A	B	-	-	C	B	C	A	-	-	A	A	A	A
5454	-	-	-	A	A	B	-	-	-	B	C	A	-	-	-	B	A	B
5086	-	-	-	A	-	B	-	-	-	B	-	A	-	-	-	A	-	A
6063, 6101	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	A	A	A	A	A

6061	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	A	A	A	A	A
Para soldar la aleación 5154 a:																		
5154	-	-	A	A	A	B	-	-	C	B	C	A	-	-	A	-	A	-
5454	-	-	A	A	A	B	-	-	C	B	C	A	-	-	A	B	A	B
6063, 6101	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	A	B	-	B	-
6061	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	A	B	-	B	-
Para soldar la aleación 5454 a:																		
5454	-	-	A	A	A	B	-	-	C	B	C	A	-	-	B	B	A	B
6063, 6101	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	B	B	-	A	-
6061	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	B	B	-	A	-
Para soldar la aleación 6061 a:																		
6063, 6101	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	A	B	C	B	C
6061	-	C	A	A	A	B	-	D	C	B	C	A	-	A	B	C	B	C
Para soldar la aleación 6063 o la 6101 a:																		
6063, 6101	-	C	A	A	A	B	-	B	A	A	A	A	-	A	B	C	B	C

A,B,C y D son calificaciones relativas (donde A es el mejor y D el peor) y se aplican a una combinación dada del metal base y el metal de aporte.

Tabla 5 Guía para la selección de aleaciones de metal de aporte para soldar con arco diversas combinaciones de aleaciones de aluminio tratables térmicamente (21) (26).

Aleaciones que han de soldarse ^a	Condición postsoldadura ^b	Facilidad de aplicación						Resistencia ^c						Ductilidad ^d						Resistencia a la corrosión ^e					
		2319	4043	4145	5039	5556 ^t	5554 ^g	2319	4043	4145	5039	5556 ^t	5554 ^g	2319	4043	4145	5039	5556 ^t	5554 ^g	2319	4043	4145	5039	5556 ^t	5554 ^g
Para soldar 2014 o 2024 a:																									
2014	X	C	B	A	-	-	-	A	B	A	-	-	-	A	A	B	-	-	-	A	B	B	-	-	-
2024	Y	C	B	A	-	-	-	A	C	B	-	-	-	A	B	B	-	-	-	A	B	B	-	-	-
Para soldar 2219 a:																									
2219	X	A	A	A	-	-	-	A	B	B	-	-	-	A	B	B	-	-	-	A	B	B	-	-	-
Para soldar 6061, 6063 o 6101 a:																									
1100	X	-	A	-	-	B	-	-	A	-	-	A	-	-	B	-	-	A	-	-	A	-	-	B	-
2014 o 2024	X	-	B	A	-	-	-	-	A	A	-	-	-	-	A	B	-	-	-	-	A	A	-	-	-
2219	X, Y o Z	-	A	A	-	-	-	-	A	A	-	-	-	-	A	B	-	-	-	-	A	A	-	-	-
3003, 3004, 5005 o 5050	X	-	A	-	-	B	-	-	B	-	-	A	-	-	B	-	-	A	-	-	A	-	-	B	-
5052, 5154 o 5454	X	-	A	-	-	B	C	-	C	-	-	A	B	-	B	-	-	A	A	-	A	-	-	B	A
5083, 5086 o 5456	X	-	-	-	-	A	B	-	-	-	-	A	B	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	A	A
6061,	X	-	A	-	-	B	C	-	C	-	-	A	B	-	B	-	-	A	A	-	A	-	-	C	B

6101, 6151																	
7005, 7039, A612, C612, D612	4043 _c	4043 ^c _{,h,k}	5356 ^b _{,h}	5039 ^e													
214, A214, B214, F214	-	4043 ^c _{,h}	5654 _{h,j}														
13, 43, 356	4145 _{b,c}	4043 ^c _{,j}															
319, 333, 355, C355	4145 _{b,c,j}																

Nota: Todos los metales de aporte que aparecen en esta tabla están cubiertos por la especificación AWS A5.10-69; y llevan como prefijo las letras "ER". En toda la tabla se ha omitido el prefijo para ahorrar espacio. Los metales de aporte 5356; 5556 y 5654 no son adecuados para servicio sostenido a temperaturas mayores de 150°F. Otras condiciones de servicio, tales como la inmersión en agua fresca o salada o la exposición a productos químicos específicos; pueden también limitar la elección del metal de aporte. En donde no se anota ningún metal de aporte, no se recomienda la combinación del metal base para soldar.

^aLos metales base 5254 y 5652 se emplean para servicio en presencia de agua oxigenada. El metal de aporte 5654 se usa para soldar ambas aleaciones para servicio a temperaturas de 150°F y menores. ^bEl metal 4043 puede usarse para algunos trabajos. ^cEl 4047 puede usarse para algunos trabajos. ^dEl 4145 puede usarse para algunos trabajos. ^eLas aleaciones 5183, 5356 o 5556 pueden usarse también. ^fLa aleación 1100 puede usarse para algunos trabajos. ^gLa 2319 puede usarse para algunos trabajos. ^hPueden usarse las aleaciones 5183, 5356, 5554 y 5654. En algunos casos estos metales de aporte dan mejor igualación de color después del tratamiento de anodizado; mejor ductilidad de la soldadura y mayor resistencia de la misma. El metal de aporte 5554 es adecuado para servicio a temperatura elevada. ⁱA veces se usa un metal de aporte de la misma composición que el metal base. ^kEl metal 5039 puede usarse para algunos trabajos.

2.2.1.15 Velocidad de avance

La velocidad de avance, de recorrido o de desplazamiento es un movimiento lineal del arco a lo largo de la unión que se va a soldar. Cuando se reduce la velocidad de recorrido se incrementa la deposición del metal de aporte por unidad de longitud y a velocidades muy bajas, el arco actúa sobre el charco de soldadura, no sobre el metal base, con lo que se reduce la penetración y se obtiene una franja ancha de soldadura (23).

Al incrementarse la velocidad de recorrido aportará al metal base menos energía térmica por unidad de longitud de la soldadura. Si se aumenta todavía más la velocidad de recorrido aparecerá socavamiento a lo largo de los bordes de la franja de soldadura, la razón de esta aparición de socavamiento es porque no hubo suficiente metal de aporte para rellenar el trayecto de la unión (23).

2.2.1.16 Voltaje del arco

Si idealmente todas las variables se mantienen constantes, el voltaje del arco tiene una relación directamente con la longitud del arco, pero la variable que nos interesa y que se debe de controlar es la longitud del arco debido a que el voltaje es más fácil de vigilar. Por esta razón se especifica el voltaje del arco que se utilizará para realizar el procedimiento de soldadura (23).

Si se trabaja con un arco largo este producirá salpicaduras excesivas además de generar porosidad y socavamiento; si el arco es demasiado corto, la punta del electrodo hará cortocircuito con el charco de soldadura, causando inestabilidad (23).

Como se mencionó anteriormente el voltaje del arco depende de la longitud del arco así como de muchas otras variables, como la composición y tamaño

del electrodo, el gas de protección, la técnica de soldadura, etc. El voltaje del arco permite expresar observar en la Figura 2. 17 (23).

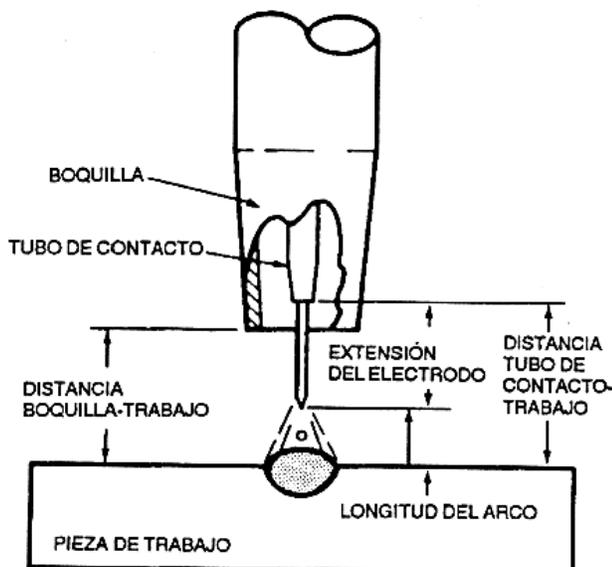


Figura 2. 17 Terminología de soldadura por arco de metal y gas (23).

Los niveles establecidos de voltaje de arco varían dependiendo del material, el gas protector y la modalidad de transferencia. En la Tabla 7 se presentan valores típicos empleados para realizar la soldadura (23).

Tabla 7 Voltajes de arco típicos para soldadura por arco GMAW de diversos metales^a (23).

Metal	Transferencia globular/por spray ^b Electrodo de 1.6 mm (0.062 pulg) de diámetro					Transferencia en cortocircuito Electrodo de diámetro			
	Argón	Helio	25 % Ar-75 % He	Ar-O ₂ (1-5 % O ₂)	CO ₂	Argón	Ar-O ₂ (1-5 % O ₂)	75 % Ar- 25 % CO ₂	CO ₂
Aluminio	25	30	29	-	-	19	-	-	-
Magnesio	26	-	28	-	-	16	-	-	-
Acero al carbono	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Acero de baja aleación	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Acero inoxidable	24	-	-	26	-	28	19	21	-

Níquel	26	30	28	-	-	22	-	-	-
Aleación cupro-níquel	25	30	28	-	-	22	-	-	-
Aleación níquel-cromo-hierro	26	30	28	-	-	22	-	-	-
Cobre	30	36	33	-	-	24	22	-	-
Aleación cobre-níquel	28	32	30	-	-	23	-	-	-
Bronce de silicio	28	32	30	28	-	23	-	-	-
Bronce de aluminio	28	32	30	-	-	23	-	-	-
Bronce fosforado	28	32	30	23	-	23	-	-	-

a. Más o menos aproximadamente 10 %. Los voltajes bajos normalmente se usan con materiales ligeros y bajo amperaje; los voltajes altos se usan con materiales pesados y alto amperaje.

b. En la variación a pulsos de la transferencia por spray, el voltaje del arco estará entre 18 y 28 volts, dependiendo del intervalo de amperaje empleado.

2.2.1.17 Corriente de soldadura

Considerando que las demás variables permanecen constantes, el amperaje de soldadura variará con la velocidad de alimentación del electrodo. Para entender mejor esta relación se muestra en la Figura 2. 18 la velocidad de alimentación y la corriente necesaria para electrodos de acero al carbono (23).

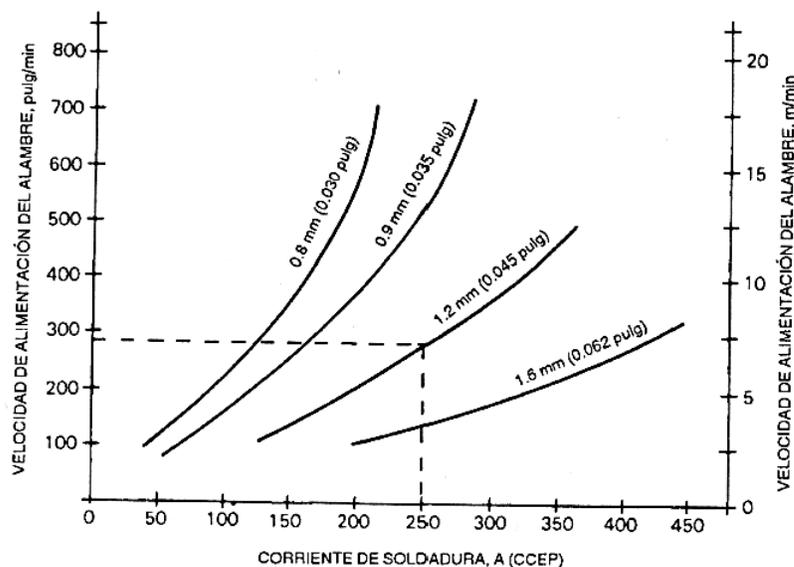


Figura 2. 18 Corriente de soldadura típica contra velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero al carbono (23).

Los niveles bajos de corriente para cada tamaño de electrodo muestran una curva casi lineal, pero al incrementar la corriente la curva deja de ser lineal. Las curvas pueden representarse aproximadamente por medio de la Ecuación 1 (23).

$$WFS = aI + bLI^2$$

Ecuación 1 Velocidad de alimentación del electrodo. (23)

donde:

WFS= velocidad de alimentación del electrodo, $\left(\frac{mm}{s} \text{ ó } \frac{pulg}{s}\right)$

a= constante de proporcionalidad para el calentamiento anódico o catódico. Su magnitud depende de la polaridad, la composición y otros factores, $\left(\frac{mm}{s.A} \text{ ó } \frac{pulg}{min.A}\right)$

b= constante de proporcionalidad para el calentamiento por resistencia eléctrica,

L= extensión del electrodo, $(mm \text{ ó } pulg)$.

I= corriente de soldadura, (A) .

Como se puede observar en la Figura 2. 19, Figura 2. 20; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 2. 21; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 2. 22 que corresponden a electrodos de acero al carbono, aluminio, acero inoxidable y cobre respectivamente hay un incremento de la corriente cuando el diámetro del electrodo aumenta (considerando que se mantiene la misma velocidad de alimentación) (23).

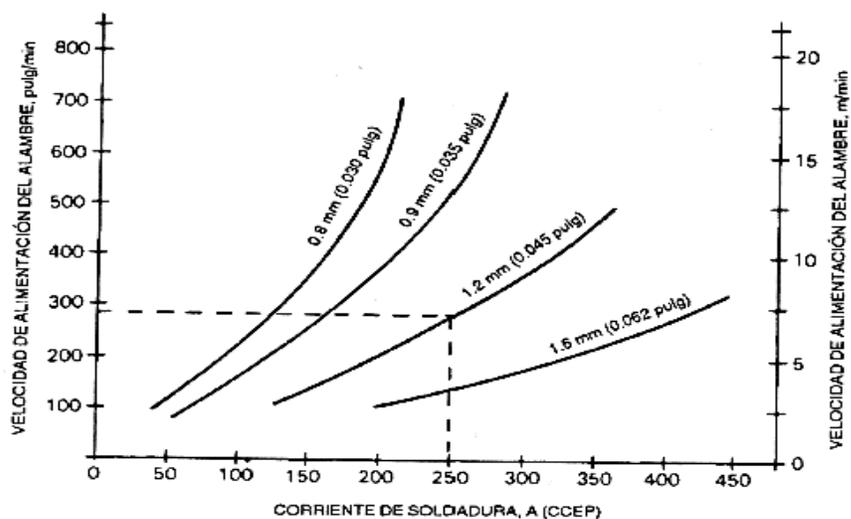


Figura 2. 19 Corrientes de soldadura típicas contra velocidades de alimentación de alambre para electrodos de acero al carbono (23).

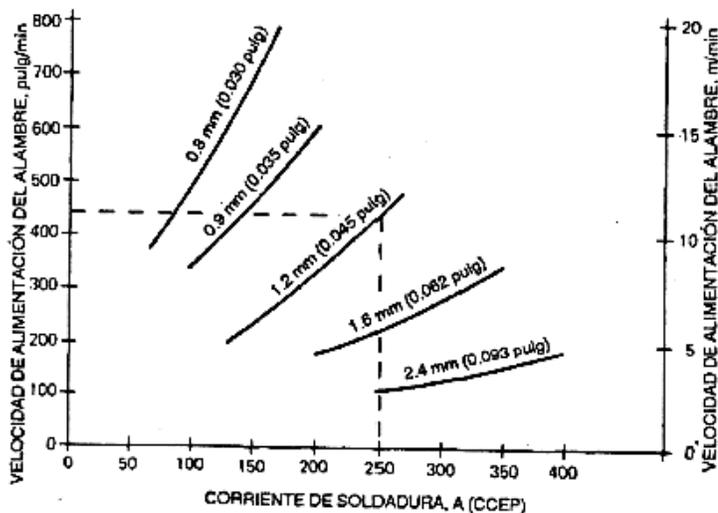


Figura 2. 20 Corrientes de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de aluminio ER4043 (23).

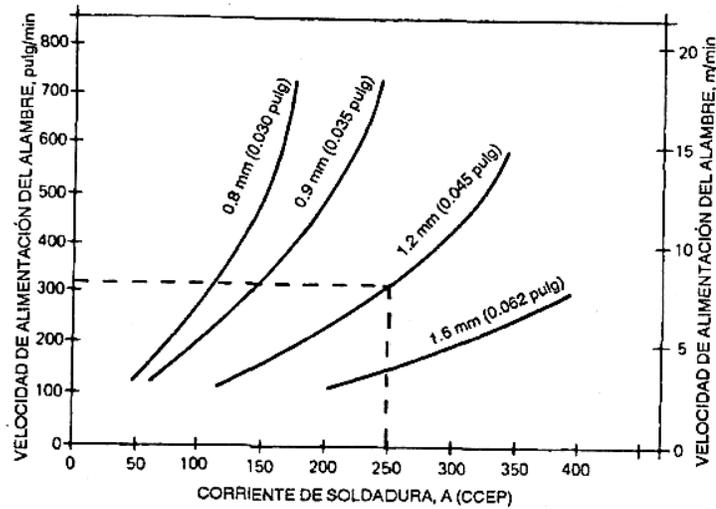


Figura 2. 21 Corrientes de soldadura típicas contra velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300 (23).

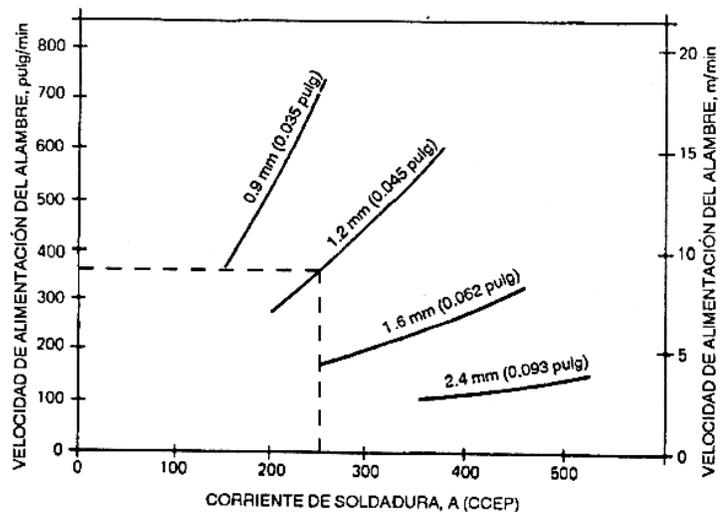


Figura 2. 22 Corriente de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de cobre ECu (23).

Si todas las demás variables se mantienen constantes, al aumentar la corriente de soldadura (velocidad de alimentación del electrodo) resultará en lo siguiente: (23)

1. Mayor penetración de la soldadura.

2. Mayor tasa de deposición.
3. Un aumento en el tamaño del cordón de soldadura.

2.2.1.18 Eficiencia de la fuente de calor y la entrada de calor

Para calcular la eficiencia de la fuente de calor se usará la Ecuación 2: (27)

$$\eta = \frac{Qt_{weld}}{Q_{nominal}t_{weld}} = \frac{Q}{Q_{nominal}}$$

Ecuación 2 Eficiencia de la fuente de calor (27).

donde:

“ Q ” es la tasa de transferencia de calor (desde la fuente de calor a la pieza de trabajo),

“ $Q_{nominal}$ ” es la potencia nominal de la fuente de calor y

“ t_{weld} ” es el tiempo de la soldadura.

Una parte de la energía proporcionada por la fuente de calor se transfiere a la pieza de trabajo y la parte restante se pierde en el entorno. Por consiguiente, $\eta < 1$. Si se conoce la eficiencia de la fuente de calor “ η ” (ver Figura 2. 23), la tasa de transferencia de calor a la pieza de trabajo, “ Q ”, se puede determinar fácilmente a partir de la Ecuación 2 (27).

En la soldadura de arco con un voltaje constante “ E ” y una corriente constante “ I ”, la eficiencia de arco se puede expresar como la Ecuación 3 (27).

$$\eta = \frac{Qt_{weld}}{EIt_{weld}} = \frac{Q}{EI}$$

Ecuación 3 Eficiencia de la fuente de calor con arco (27).

Cabe señalar que en la comunidad de soldadura, el término de la entrada de calor se refiere a menudo a la “ $Q_{nominal}$ ” ó “ EI ” en el caso de la soldadura por arco y el término de la entrada de calor por unidad de longitud de la soldadura a menudo se refiere a la relación “ $Q_{nominal}/V$ ” ó “ EI/V ”, donde “ V ” es la velocidad de soldadura ($\frac{in}{min}$ ó $\frac{mm}{min}$), dicha relación se puede apreciar en la Ecuación 4 (28).

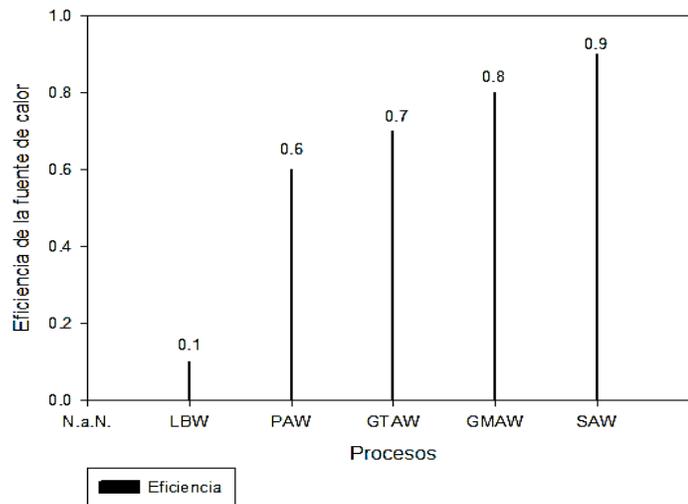


Figura 2. 23 Eficiencias de las fuentes de calor en algunos procesos de soldadura (27).

$$Q = \frac{\eta 60EI}{1000V}$$

Ecuación 4 Entrada de calor por unidad de longitud de la soldaduras con arco (28).

donde:

“ Q ” es la entrada de calor ($\frac{kJ}{in}$ ó $\frac{kJ}{mm}$),

“ η ” es la eficiencia de la fuente de calor,

“ E ” es el voltaje (*Volts*),

“ I ” es la corriente (*Amperes*) y

“ V ” es la velocidad de desplazamiento ($\frac{in}{min}$ ó $\frac{mm}{min}$) (28).

2.3 Control de calidad

2.3.1 Ensayos destructivos

Los ensayos destructivos se definen como aquellas pruebas que se realizan a un material utilizando máquinas universales a diferentes cargas según las normas vigentes. Existen diversos ensayos destructivos de los cuales se mencionarán algunos a continuación: (29)

Ensayo de tensión: La prueba de tensión provee información sobre el esfuerzo a la cedencia, fluencia y % de ductilidad de aquellos materiales sometidos a una carga uniaxial (como se puede observar en la Figura 2. 24), donde se puede determinar la ubicación de los principales puntos que describen el comportamiento elástico/plástico del material (resistencia a la tensión, límite elástico, % de alargamiento, fractura) (30).

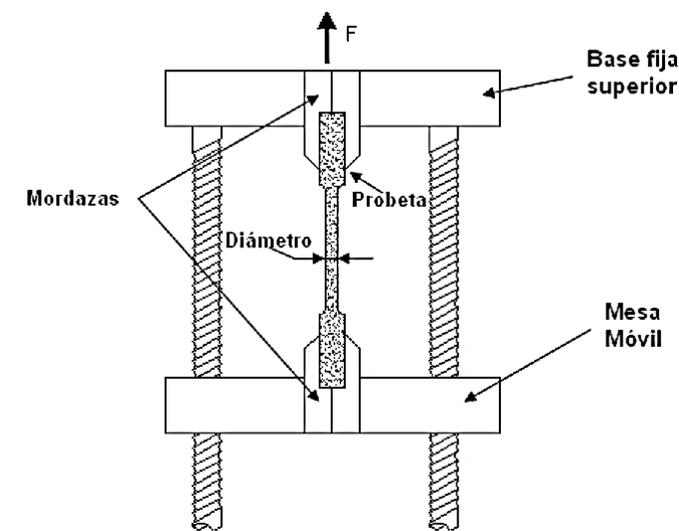


Figura 2. 24 Máquina donde se lleva a cabo la prueba de tensión (31).

El objetivo de esta prueba es determinar la cedencia al 0.2 % de deformación (como se ve en la Figura 2. 25), llegar a la rotura y determinar la fuerza de tracción, alargamiento y reducción de área en el material (30).

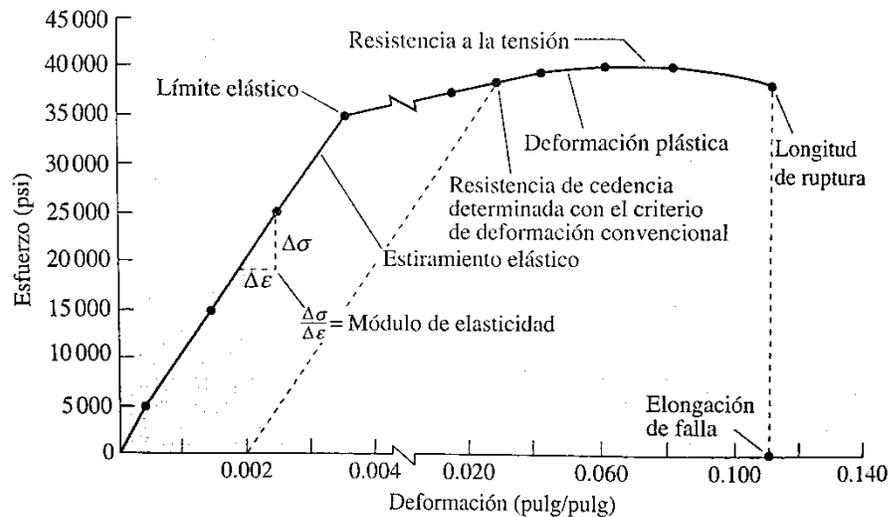


Figura 2. 25 Curva esfuerzo-deformación ingenieril (32).

Ensayo de dureza: Es la propiedad de oposición de los materiales a ser rayado o penetrado por otro material (30).

Existen diferentes ensayos de dureza de los cuales se mencionaran a continuación:

Ensayo de dureza Brinell: Consiste en la implementación de una bola de acero extra duro como penetrador con un diámetro “D”, que se apoya sobre el metal a estudiar; ejerciendo sobre la misma una fuerza “P” durante un tiempo “t”, lo que dará como resultado una huella con un diámetro “d” sobre el metal (ver Figura 2. 26). Con ayuda de la ecuación de Brinell podemos conocer la dureza del material Ecuación 5 (33).

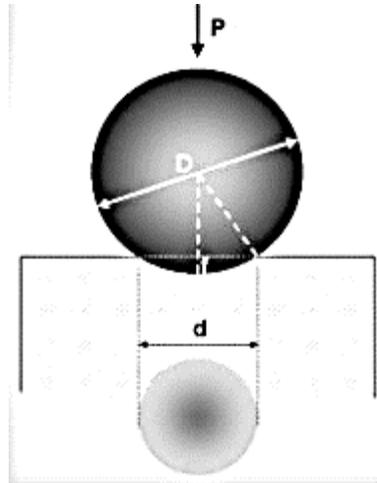


Figura 2. 26 Ilustración del ensayo de dureza Brinell (33).

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \left(\frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}} \right)$$

Ecuación 5 Dureza Brinell (33) (30).

donde:

- P= Carga aplicada
- D= Diámetro del indentador
- d= Diámetro de la huella (33).

Ensayo de micro dureza Vickers: El ensayo de micro dureza Vickers tiene como objetivo, como el Brinell, de determinar la dureza del metal a estudiar. El penetrador tiene forma de una pirámide de diamante de base cuadrada, cuyo ángulo es de 136°, Figura 2. 27, cuya dureza se calcula con la Ecuación 6 (33).

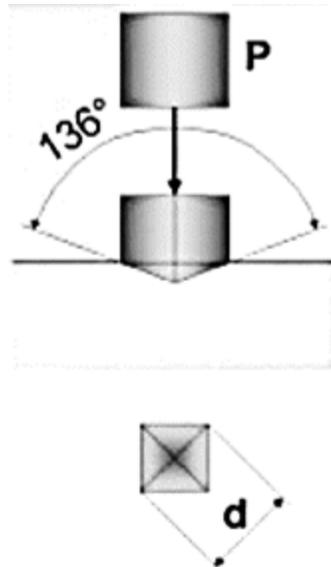


Figura 2. 27 Penetrador Vickers (33).

$$HV = \frac{2000P \operatorname{sen} (\alpha/2)}{d^2}$$

Ecuación 6 Ecuación de microdureza Vickers (33).

Donde “*d*” es la medida diagonal en *mm*, “*P*” es la carga aplicada en *gf* y “*α*” es el ángulo de la cara (136°).

2.3.2 Ensayos no destructivos

Los END (ensayos no destructivos por sus siglas en español) o NDT (Non Destructive Testing por sus siglas en inglés), son métodos que se utilizan para evaluar la calidad de algún material sin dañar su composición química o su geometría. Diversas industrias como la petroquímica, la naval, la automotriz, la aeronáutica o de construcción utilizan estos métodos para evaluación de sus materiales (34).

Este tipo de ensayos son importantes ya que permiten detectar a tiempo los defectos e imperfecciones en diversas piezas soldadas con lo cual se evita reparación y pérdida monetaria (34).

Existen diversos tipos de ensayos no destructivos (ver Tabla 8) pero los más utilizados son los siguientes: (34)

Inspección Visual (VT): Este método de inspección es el más utilizado por ser fácil de aplicar, rápido y de un costo relativamente bajo debido que proporciona información antes, durante y después de la aplicación de la soldadura. Con este método se puede examinar los materiales o las uniones soldadas para detectar imperfecciones superficiales que pueden causar en un futuro fallas de resistencia y fatiga (21) (34).

Líquidos Penetrantes (PT): Este método de inspección utiliza la acción capilar para detectar discontinuidades superficiales que no son visibles a simple vista en materiales ferrosos y no ferrosos. Este ensayo no se puede aplicar en materiales porosos, en superficies pintadas o con algún tipo de recubrimiento (ASTM E165) (21) (34).

Partículas Magnéticas (MT): Este método de inspección puede localizar discontinuidades superficiales y subsuperficiales que son demasiado finas y de difícil valoración a simple vista en: piezas de diferentes tamaños y formas, superficies con acabados soldados y todo tipo de materiales ferromagnéticos. La limitante de este ensayo es que solo puede aplicarse a materiales ferromagnéticos, el aluminio es un material paramagnético, eso quiere decir que es un material que no puede ser magnetizado y no puede aplicarse a este tipo de ensayo no destructivo (ASTM E709) (21) (34).

Radiografía o Rayos X (RT): Este método de inspección utiliza radiaciones de onda corta, como los rayos X y los gamma, que tienen la propiedad de

atravesar o penetrar los materiales opacos sin reflejarse ni refractarse ubicando las discontinuidades internas, dichas discontinuidades absorben la radiación y en la impresión fotográfica aparecerá una imagen sombreada que indicará la presencia del defecto (ASTM E94) (21) (34).

Ultrasonido (UT): Este método de inspección utiliza un equipo de medición de ondas acústicas de alta frecuencia que viaja a través de toda la pieza a inspeccionar, con el objetivo de detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales de cualquier densidad ubicadas a gran profundidad mediante la utilización de un cristal piezoeléctrico dentro de un palpador; cuando las ondas inciden o chocan con una discontinuidad está es reflejada y es detectada por el cristal piezoeléctrico emitiendo una señal eléctrica el cual es registrado en el equipo de medición para que pueda ser interpretado (ASTM E164) (21) (34).

Tabla 8 Métodos no destructivos (21).

Método no destructivos	Permite la detección de	Ventajas	Limitaciones
Visual	Discontinuidades superficiales.	Bajo costo, puede aplicarse a la pieza durante el proceso.	Solo se aplica solamente a defectos superficiales.
Líquidos penetrantes	Discontinuidades superficiales no apreciables a simple vista.	Aplicable a materiales magnéticos y no magnéticos, fácil de usar, bajo costo.	Sólo puede detectar los defectos superficiales.
Partículas magnéticas	Discontinuidades superficiales y sub superficiales	Aplicable a piezas de diferentes tamaños y formas y en superficies con acabados soldados.	Solo se aplica a materiales ferromagnéticos.
Radiográficos	Discontinuidades sub superficiales	Permite identificar fácilmente las discontinuidades en los cordones de soldadura.	Se requiere capacitación para calibrar/manejar el equipo de trabajo e interpretar los resultados.
De ultrasonido	Discontinuidades superficiales y sub superficiales	Permite detectar discontinuidades pequeñas de difícil detección.	Se requiere capacitación para calibrar/manejar el equipo de trabajo e interpretar los resultados.

2.4 Aleaciones de Aluminio

2.4.1 Características del aluminio

A continuación, se enumeran las principales características físicas y químicas del aluminio, en contraste con los del acero. Como se observa hay una serie de diferencias importantes entre el aluminio y el acero, que influyen en el comportamiento de soldadura: (35)

1. Los puntos de fusión de los dos metales y sus óxidos, en donde los óxidos de hierro se funden cerca o por debajo del punto de fusión del metal; la Al_2O_3 (α) se funde a 2060°C , algunos 1400°C por encima del punto de fusión del aluminio. Esto tiene importantes implicaciones para el proceso de soldadura ya que es esencial para eliminar y dispersar esta película de óxido antes y durante la soldadura con el fin de lograr la calidad de la soldadura requerida.
2. La película de óxido de aluminio es resistente y tenaz. Esto le da a las aleaciones de aluminio una resistencia a la corrosión excelente, lo que les permite ser utilizados en aplicaciones expuestas sin protección adicional. Esta resistencia a la corrosión se puede mejorar aún más por anodización (que es la formación de una película de óxido de un espesor controlado).
3. La conductividad térmica del aluminio es seis veces mayor que la del acero. El resultado de esto es que la fuente de calor para la soldadura de aluminio tiene que ser mucho más intensa y concentrada que para el acero. Esto es particularmente así para las secciones gruesas, donde los procesos de soldadura por fusión pueden producir defectos por falta de fusión si el calor se pierde demasiado rápido.
4. El aluminio tiene una alta conductividad eléctrica, sólo tres cuartas partes de cobre, seis veces mayor que la del acero. Esto es una desventaja

cuando se utiliza la soldadura por puntos por resistencia, en donde el calor para la soldadura debe ser producido por la resistencia eléctrica.

5. El aluminio no cambia su estructura cristalina cuando se calienta o se enfría, a diferencia del acero que sufre transformaciones cristalinas o cambios de fase a temperaturas específicas. Esto hace que sea posible endurecer el acero por enfriamiento rápido pero los cambios en la velocidad de enfriamiento tienen poco o ningún efecto sobre las aleaciones de aluminio (35).

2.4.2 Estructura de los metales

En los metales los tres arreglos cristalinos más comunes son: cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC) y hexagonal compacta (HCP). Vistas esquemáticas de las tres estructuras se dan en la Figura 2. 28 (35).

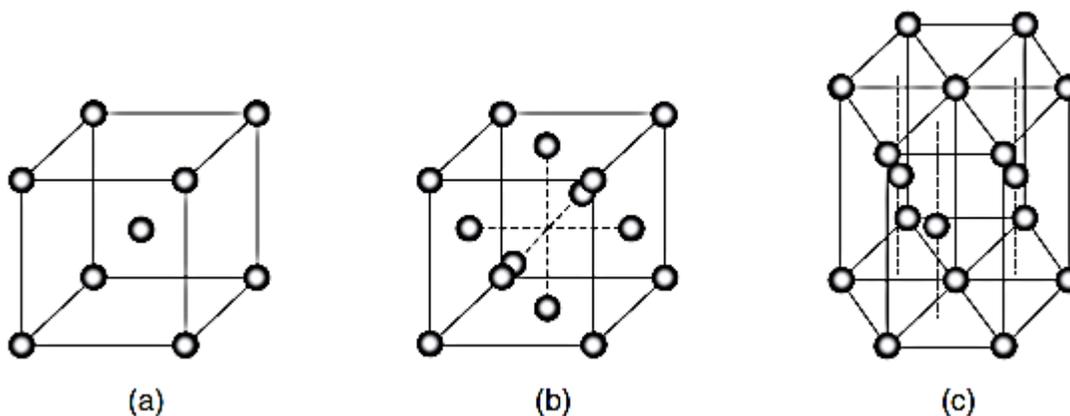


Figura 2. 28 Las tres formas cristalinas de los metales: (a) cúbica centrada en el cuerpo; (b) cúbica centrada en las caras; (c) hexagonal compacta (35).

Cada estructura cristalina confiere ciertas propiedades físicas en el metal. Los metales con estructura cúbica centrada en las caras, de las que el aluminio posee, le permite poseer propiedades como: ductilidad, moldeabilidad, alta tenacidad a bajas temperaturas (criogénicas) (35).

2.4.3 Control del tamaño del grano

El tamaño de grano se usa ampliamente en la reducción del riesgo de agrietamiento en caliente, en el control de la resistencia y la tenacidad en aceros de baja aleación. En términos generales, a medida que aumenta el tamaño de grano, se reducen los límites de elasticidad y la ruptura por tracción de un metal. El σ_y (límite de elasticidad), se relaciona con el tamaño de grano por la ecuación de Hall-Petch (ver Ecuación 7): (35)

$$\sigma_y = \sigma_I + k_y d^{-1/2}$$

Ecuación 7 Límite de elasticidad (35).

Donde “d” es el diámetro medio de grano y “ σ_I y k_y ” son constantes para el metal. Los resultados típicos de esta relación se ilustran en la Figura 2. 29.

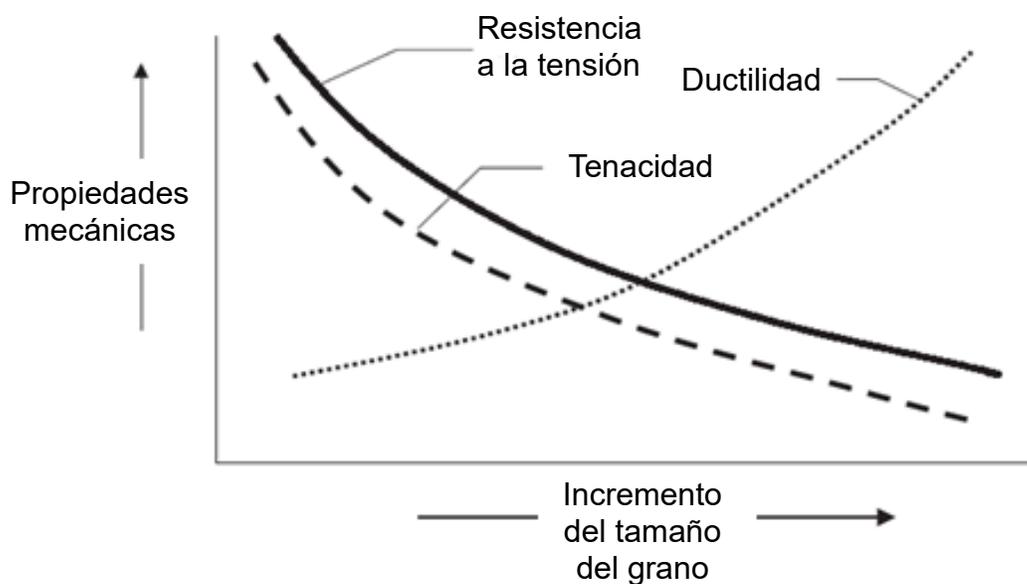


Figura 2. 29 Relación general del tamaño de grano con la resistencia, ductilidad y tenacidad (35).

La consecuencia práctica de ello es que se encuentra una pérdida de resistencia a menudo en la ZAC de las soldaduras debido al crecimiento de grano durante la soldadura. Una pérdida de resistencia también se puede

encontrar en el metal de soldadura que es una estructura de colada con un tamaño de grano mayor que el del metal base. El tamaño de grano, sin embargo, tiene un efecto marcado sobre el riesgo de agrietamiento en caliente, un tamaño de grano pequeño es más resistente que un tamaño de grano grande. El titanio, zirconio y escandio se pueden utilizar para promover un tamaño de grano fino, estos elementos forman finamente partículas sólidas dispersas en el metal de soldadura. Estas partículas actúan como núcleos en la que los granos se forman como un producto de solidificación (35).

2.4.4 Trabajo en frío

El trabajo en frío o endurecimiento por deformación es un proceso importante que se utiliza para incrementar la resistencia y/o dureza de los metales y aleaciones que no se pueden reforzar utilizando algún tratamiento térmico. Se trata de un cambio de forma provocada por la entrada de energía mecánica. A medida que avanza la deformación del metal se vuelve más resistente pero menos dúctil, como se muestra en la Figura 2. 30 lo que requiere cada vez más energía para continuar deformando el metal (35).

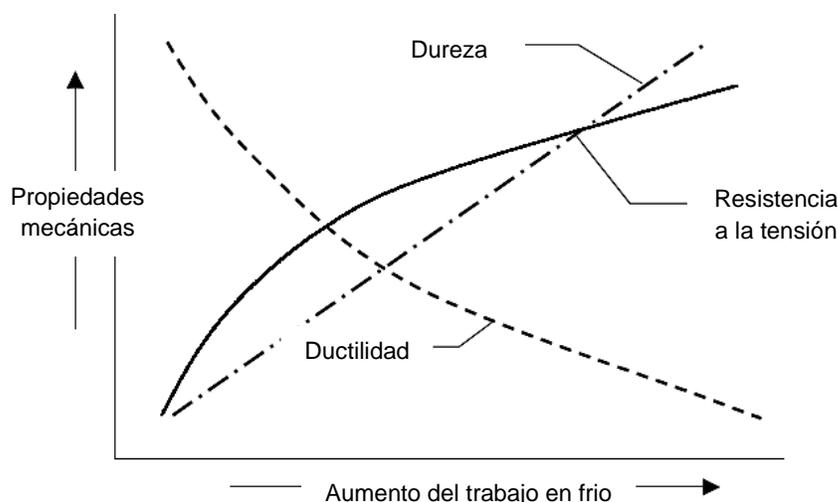


Figura 2. 30 Ilustración del efecto del trabajo en frío en la resistencia, dureza y ductilidad (35).

Por último, una etapa donde se alcanza una deformación adicional no es posible – ya que el metal ha llegado a ser tan frágil que cualquier deformación adicional conduce a la fractura (35).

2.4.5 Problemas de la solubilidad en el Aluminio

2.4.5.1 Porosidad en el aluminio y sus aleaciones

El término de la porosidad se usa para describir los huecos globulares que se encuentran con frecuencia en los cordones de soldadura, estos huecos se forma a partir de gas disuelto en el metal de aporte fundido que queda atrapado a medida que se solidifica, formándose de este modo las burbujas en la soldadura solidificada como se puede observar en la Figura 2. 31. (35).

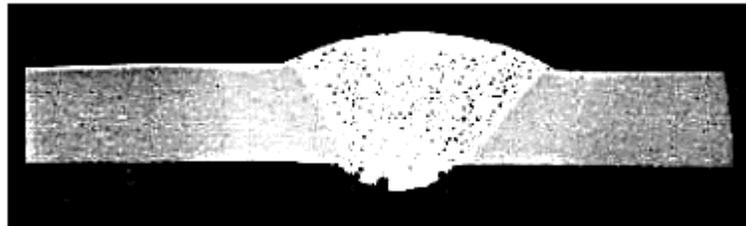


Figura 2. 31 Porosidad finamente distribuida en una placa de 6mm de espesor unido por soldadura TIG a tope. (35)

La porosidad puede variar de ser extremadamente fina (micro-porosidad), a poros gruesos de 3 o 4 *mm* de diámetro. El culpable en el caso del aluminio es el hidrógeno, que tiene una alta solubilidad en aluminio fundido, pero muy baja solubilidad en el sólido, como se puede observar en la Figura 2. 32 (35).

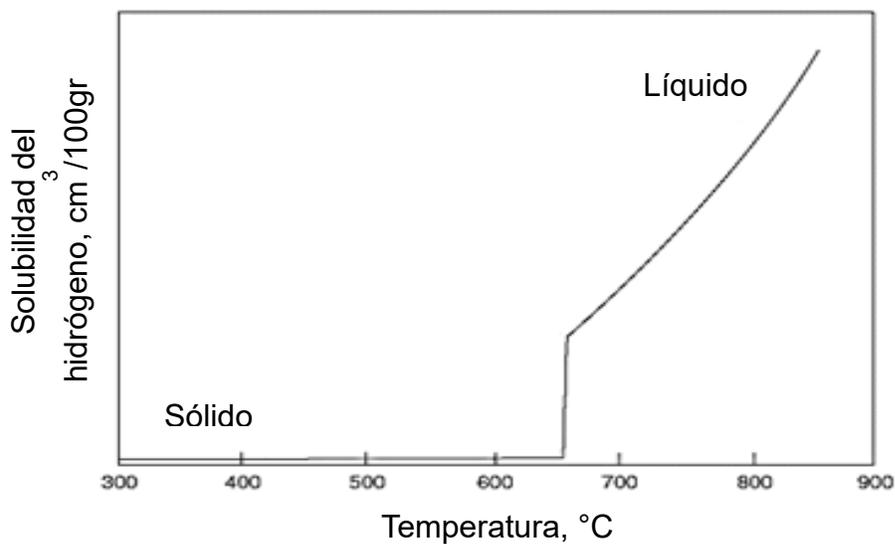


Figura 2. 32 Solubilidad del hidrógeno en el aluminio puro (35).

La porosidad tiende a ser más baja en las soldaduras autógenas. Cuando el metal de aporte se utiliza, niveles de porosidad tienden a aumentar debido a la contaminación del alambre. El proceso de soldadura por fusión convencional TIG tiene niveles más bajos de porosidad que el MIG debido a esta contaminación de hidrógeno del alambre (35).

El aumento de la corriente de arco incrementa la temperatura del baño de soldadura y por lo tanto aumenta la velocidad de absorción de hidrógeno en el metal fundido. El aumento de tensión y/o la longitud del arco incrementan la exposición del metal fundido a la contaminación aumentando la porosidad. La composición de la aleación también puede influir en la cantidad de porosidad cambiando la solubilidad del hidrógeno, el magnesio en particular, tiene un efecto beneficioso. Se cree que el magnesio aumenta la solubilidad y reduce la absorción de hidrógeno, por tanto, en 6 % de Mg. El cobre y silicio tienen el efecto contrario. Una conclusión que se puede sacar de esto es que cuando se encuentra la porosidad se usa metal de aporte Al-Mg para ayudar a reducir el problema. Este asume, por supuesto, que tal metal de aporte es aceptable en la

aplicación específica. A continuación se mencionarán algunas fuentes de hidrógeno que provocan la porosidad en el aluminio: (35)

1. Los consumibles de soldadura.
2. La humedad en los procesos SMAW y SAW; ya que durante la soldadura la humedad se descompone en el arco para dar hidrógeno, dando como resultado una gran cantidad de porosidad.
3. El gas de protección debe ser altamente puro.
4. El sistema de suministro de gas, ya que la humedad se acumula en la manguera debido a que el equipo de soldadura ha estado inactivo durante largos periodos de tiempo.
5. Limpieza del metal base (35).

2.4.5.2 Eliminación de la película de óxido durante la soldadura

Es necesario eliminar la película de óxido antes de la soldadura para reducir el riesgo de la porosidad. La Figura 2. 33 muestra la película de óxido en una soldadura de filete que, obviamente, tendrá un efecto pronunciado sobre la resistencia de la unión (35).

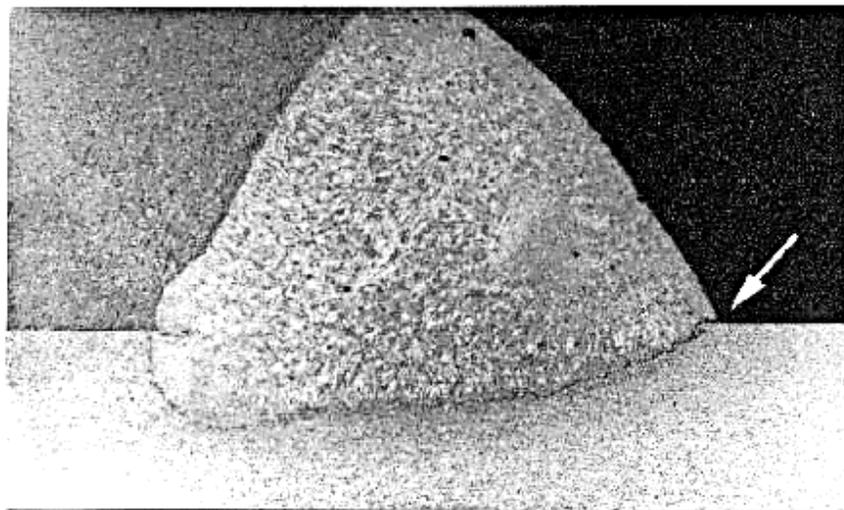


Figura 2. 33 Atrapamiento de óxido en la soldadura por filete (35).

El óxido de aluminio (Al_2O_3) es un óxido de formación rápida que brinda al aluminio su excelente resistencia a la corrosión. El óxido de aluminio tiene un punto de fusión muy alto de 2060°C en comparación con el metal puro que funde a 660°C . Los óxidos de la mayoría de los otros metales se funden a temperaturas por debajo de la de sus metales y durante la soldadura flotará en la parte superior del charco de soldadura como una escoria fundida (35).

2.4.5.3 Agrietamiento en caliente

El agrietamiento en caliente es un problema en la soldadura que no se produce en los metales puros sino que puede ser encontrado en ciertos sistemas de aleación. No se limita a las aleaciones de aluminio, pero también se encuentra en los aceros, níquel y aleaciones de cobre. El mecanismo fundamental es el mismo en todos los sistemas de aleación y es una función de cómo se solidifican sistemas de aleación del metal. Como su nombre indica, se trata de un mecanismo de craqueo a alta temperatura que se conoce por varios nombres diferentes: fisuración en caliente, agrietamiento en caliente, fragilidad en caliente, licuación de agrietamiento, la línea central de agrietamiento o solidificación de agrietamiento (35).

La adición de elementos de aleación a un metal puro causará un cambio en la temperatura de congelación de la aleación y de la del metal puro puede resultar en un número de diferentes fases como por ejemplo: una solución sólida, un eutéctico y un compuesto intermetálico. Estos cambios de estado y las proporciones relativas de cada fase están representados en los diagramas de fase. La composición química del punto de fusión más bajo de la aleación se conoce como la composición eutéctica que se congela a una temperatura específica. Las otras composiciones no eutécticas se congelan en un rango (35).

Es necesario observar cómo un metal se solidifica. La Figura 2. 34 muestra la forma en que los componentes de punto de fusión más bajos son expulsados a los límites de grano y como las partículas sólidas crecen en tamaño (35).

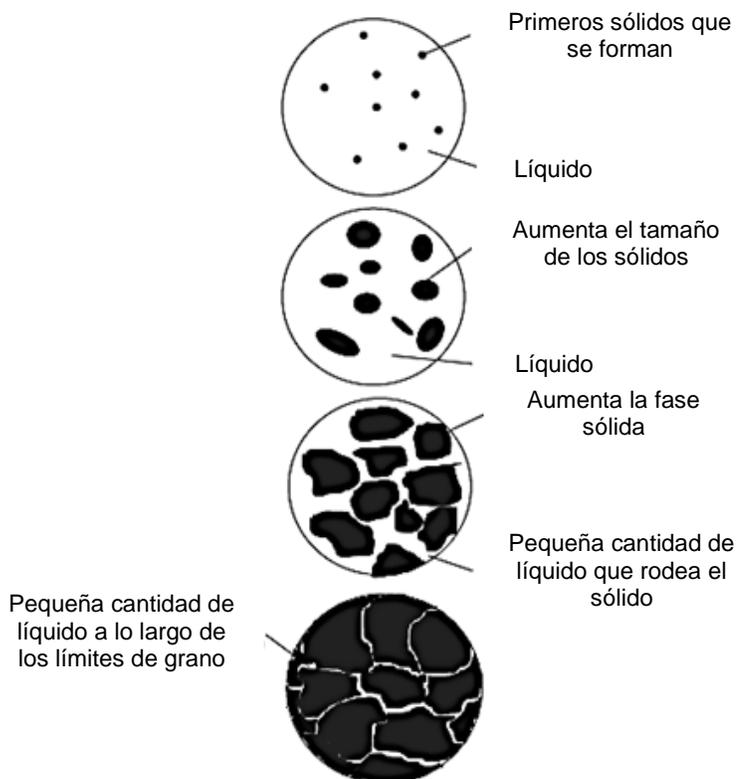


Figura 2. 34 Solidificación de un metal (35).

Las aleaciones de aluminio muestran un pico en la sensibilidad con una alta resistencia al agrietamiento en caliente en el contenido tanto de una aleación baja como de alta, como se muestra en la Figura 2. 35. A niveles bajos de contenido de aleación sólo hay una pequeña cantidad presente eutéctica (35).

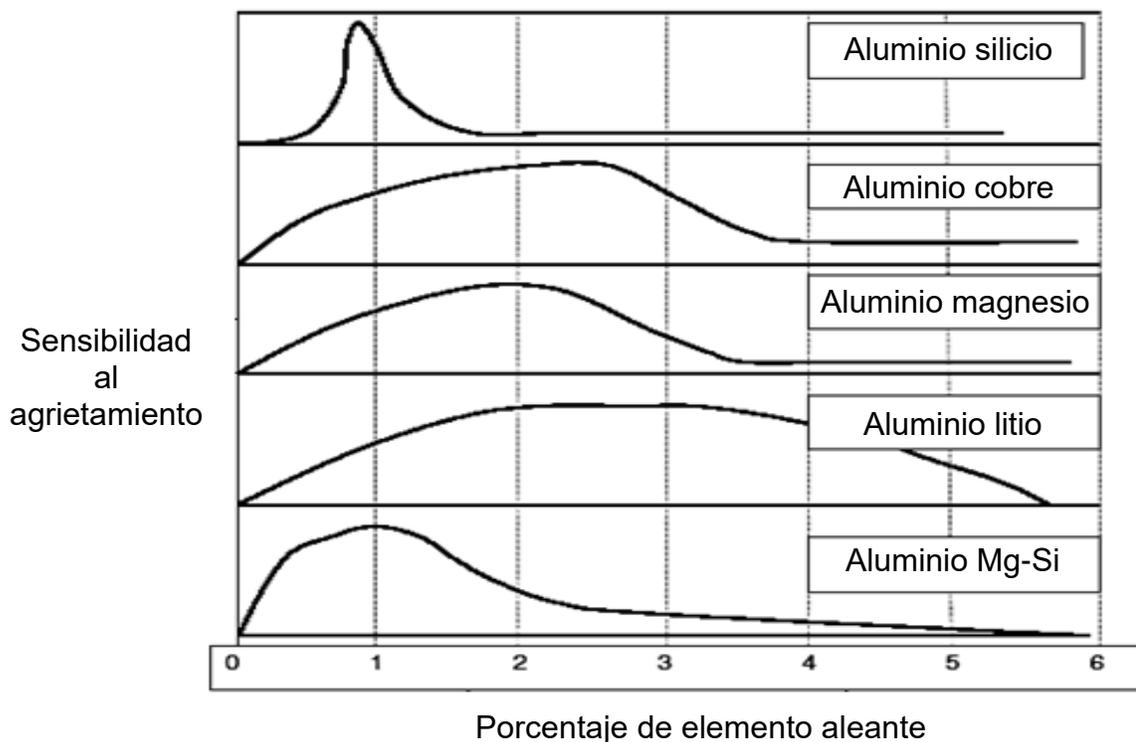


Figura 2. 35 Efecto de la concentración de soluto en la sensibilidad del agrietamiento (35).

2.4.6 Elementos aleantes, clasificación y designación

2.4.6.1 Criterios para la designación

Las aleaciones de aluminio se pueden dividir en dos grandes clases, fundición y productos maleables (forjados). Estas dos clases se pueden subdividir en familias de aleaciones basadas en la composición química y en la designación del templado. Las designaciones de templado se utilizan para identificar la condición de la aleación, en otras palabras la cantidad de trabajo en frío a la que se ha sometido la aleación o su condición de tratamiento térmico. Hay una serie de sistemas disponibles para la identificación de la aleación y su condición. El Comité Europeo de Normalización (CEN) se utiliza

como estándar. Este sistema utiliza cuatro dígitos para identificar las aleaciones de forjado y tres dígitos para identificar las aleaciones de fundición (35).

2.4.6.2 Elementos aleantes

Los principales elementos de aleantes del aluminio son el cobre, silicio, manganeso, magnesio, litio y zinc. Los elementos tales como níquel, cromo, titanio, zirconio y escandio se pueden añadir en pequeñas cantidades para conseguir propiedades específicas. Otros elementos también pueden estar presentes en pequeñas cantidades como impurezas no deseadas. Estos elementos, conocidos como elementos residuales, no tienen efectos beneficiosos sobre las propiedades mecánicas y los productores de aluminio intentan eliminar éstos de sus productos. Los principales efectos de los elementos aleantes son los siguientes: (35)

- El magnesio (Mg) aparece en proporciones menores al 10 %, tiene buena resistencia a la corrosión y se mecaniza con facilidad. Es la base para obtener dureza y resistencia en los tratamientos térmicos de aleaciones Al-Si que contienen Cu, Ni y otros elementos para los mismos propósitos. La fase dura Mg_2Si muestra una solubilidad limitada de aproximadamente 0.7 % Mg, más allá no existe endurecimiento por precipitación. Las aleaciones binarias Al-Mg son utilizadas en aplicaciones que requieran una superficie brillante, resistencia a la corrosión y buena ductilidad. Los rangos de composición son de 4 a 10 % Mg, composiciones mayores del 7 % Mg son tratables térmicamente.
- El manganeso (Mn) aumenta la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión. La temperatura del punto eutéctico es de 658.5°C con 1.95 % de Mn. Es considerado normalmente una impureza en las aleaciones de aluminio de fundición. Sin embargo, el Mn es un elemento importante en las aleaciones dúctiles. En la ausencia del

endurecimiento por deformación, el Mn no aporta beneficios significativos en las aleaciones de aluminio.

- El cobre (Cu) no supera el 15 %, porque si sobrepasa se forman compuestos intermetálicos (Al_2Cu) que hacen frágil la aleación. El cobre endurece mucho al aluminio, mantiene buena maquinabilidad, ligereza y resistencia al calor. Mejora sustancialmente la resistencia y la dureza. Las aleaciones con contenidos de cobre de 4 a 6 % responden muy bien a los tratamientos térmicos. El cobre repercute negativamente en la resistencia al agrietamiento en caliente y las características de colada.
- El silicio (Si) endurece al aluminio, aumenta la fluidez en la colada, su resistencia a la corrosión y las aleaciones de Al-Si son muy dúctiles. La temperatura del punto eutéctico es de 577°C con 11.6 % de Si. Las adiciones de silicio en el aluminio puro mejoran dramáticamente la fluidez y la resistencia al desgarramiento en caliente.
- El zinc (Zn) aumenta la resistencia, permite el endurecimiento por precipitación, puede causar corrosión por tensión y como dato importante el zinc es un supresor de la temperatura.
- El hierro (Fe) mejora la resistencia al agrietamiento en caliente. Sin embargo, un incremento en la concentración de hierro, es acompañado por un decremento en la ductilidad. El Fe reacciona para formar una gran cantidad de fases insolubles en las aleaciones; las más comunes son FeAl_3 , FeMgAl_6 y $\alpha\text{-AlFeSi}$. Estas fases insolubles son responsables del mejoramiento en esfuerzo, especialmente a temperaturas elevadas. Como la fracción de la fase insoluble aumenta cuando se incrementa el contenido de Fe, las propiedades de colada se ven afectadas.
- El cromo (Cr) endurece y aumenta la resistencia a la corrosión, no aparece con más del 1 %. Típicamente forma el compuesto Al_7Cr , que es usado para suprimir el crecimiento de grano.
- El níquel (Ni) endurece y aumenta la resistencia a la corrosión, no aparece con más del 1 %.

- El titanio (Ti) se utiliza como elemento refinador de grano, sobre todo en los metales de aporte.
- El zirconio (Zr) se utiliza como un elemento refinador de grano, en particular en los metales de aporte.
- El litio (Li) aumenta sustancialmente la resistencia y el módulo de elasticidad, proporciona endurecimiento por precipitación y disminuye la densidad.
- El escandio (Sc) aumenta sustancialmente la resistencia por el endurecimiento por envejecimiento y es un elemento refinador de grano sobre todo en el metal base.
- El plomo (Pb) y bismuto (Bi) ayudan en la formación de viruta en aleaciones de fácil mecanizado.
- El estroncio (Sr) modifica la morfología de las partículas de silicio que forman el eutéctico divorciado presente en estas aleaciones Al-Si.
- El boro (B) se combina con otros metales para obtener boruros como TiB_2 . El boruro de titanio forma sitios de nucleación para interacción con fases activas de refinamiento de grano como $TiAl_3$ en aluminio fundido. Los boruros metálicos en partículas gruesas son inclusiones que afectan las propiedades mecánicas y la ductilidad. A altas concentraciones de B, los boruros contribuyen a la aglomeración de partículas, incrementan el riesgo de inclusiones y la formación de lodos ($\alpha-AlFeSi$). Sin embargo, el uso de este elemento en aleaciones con elementos peritéticos mejora la conductividad eléctrica.
- El antimonio (Sb) ($\geq 0.05\%$) refina la fase eutéctica Al-Si en las composiciones hipoeutécticas. La efectividad del antimonio de alterar el eutéctico depende de la ausencia del fósforo y de una velocidad de solidificación adecuada. El antimonio también reacciona con sodio o estroncio para formar intermetálicos con un efecto adverso en la estructura del eutéctico. El antimonio se clasifica como un metal pesado con un potencial de toxicidad alto. Como aleante, sin embargo, no hay

peligro de intoxicación en aleaciones de aluminio con niveles de 0.08-0.15 % de Sb.

- El Berilio (Be) al agregar pocas partes por millón de este elemento es efectivo para reducir la pérdida por oxidación y las inclusiones asociadas a aleaciones que contengan magnesio. Algunos estudios han demostrado que la concentración de berilio requerida para la supresión de la oxidación es inversamente proporcional al contenido de magnesio. A altas concentraciones (> 0.04 %) el berilio afecta la forma y composición de los intermetálicos de Fe, aumentando marcadamente la resistencia y ductilidad. Además de cambiar beneficiosamente la morfología de la fase insoluble, el Be cambia su composición, sacando al magnesio del complejo Al-Fe-Si y dejándolo disponible para el endurecimiento por precipitación. Sin embargo, el berilio está catalogado como un elemento cancerígeno, por lo que se requiere precaución en su manejo.
- El Bismuto (Bi) mejora la maquinabilidad de las aleaciones de aluminio de fundición a concentraciones mayores a 0.1 %.
- El Cadmio (Cd) (>0.1 %) ayuda a mejorar la maquinabilidad.
- El Calcio (Ca) es un modificador débil del eutéctico Al-Si. Este elemento incrementa la solubilidad del hidrógeno, por lo que también es responsable de la porosidad a niveles de bajas concentraciones. Las concentraciones mayores a 0.005 % afectan adversamente la ductilidad en las aleaciones de aluminio con magnesio como elemento aleante principal.

2.4.6.3 Clasificación

Las aleaciones de aluminio maleables (forjadas) se clasifican en función de su elemento aleante principal (36).

Serie 2XXX.- El principal elemento aleante es el cobre, pero a veces también se le añade magnesio. Las características de esta serie son:

- Tiene buena relación entre dureza-peso, y
- Tiene mala resistencia a la corrosión.

Algunas de las aleaciones de esta serie tienen que ser sometidas a tratamientos térmicos de solubilidad y a veces de envejecimiento para mejorar sus propiedades mecánicas. Una vez hecho esto la serie 2xxx tiene unas propiedades mecánicas a veces superiores que los aceros de bajo carbono. El efecto de los tratamientos térmicos es aumentar la dureza con una disminución del alargamiento. Estas aleaciones generalmente son galvanizadas con aluminio de alta pureza o con aleaciones de la serie 6xxx para protegerlas de la corrosión. Los usos más frecuentes que se le dan a estos aluminios son en las ruedas de los camiones y de los aviones, en la suspensión de los camiones, en el fuselaje de los aviones, en estructuras que requieran buena dureza a temperaturas superiores a 150°C (36).

Serie 3XXX.- El principal elemento aleante es el manganeso. Estas aleaciones tan sólo tienen un 20 % más de dureza que el aluminio puro. Eso es porque el manganeso sólo puede añadirse de forma efectiva en solo un 1.5 %. Por ello hay muy pocas aleaciones de esta serie. Sin embargo, los aluminios 3003 y 3105 son muy usados para fabricar utensilios de cocina, intercambiadores de calor, mobiliario, señales de tráfico, tejados y otras aplicaciones arquitectónicas (36).

Serie 4XXX.- El principal elemento aleante es el silicio que suele añadirse en cantidades por encima del 12 % para obtener una disminución de rango de fusión de la aleación. El objetivo es conseguir una aleación que funda a una temperatura más baja que el resto de aleaciones de aluminio para usarlo como elemento de soldadura (36).

Serie 5XXX.- El principal elemento aleante es el magnesio cuyo objetivo es de endurecer más el aluminio que el manganeso (0.8 % de Mn produce el mismo efecto que un 1.25 % de Mn). Las principales características de estas aleaciones son durezas medias a altas por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión en ambiente marino y una capacidad de trabajo en frío. Estas características hacen que estas aleaciones se usen para adornos decorativos, ornamentales y arquitectónicos, en el hogar, iluminación de las calles y carreteras, botes, barcos y tanques criogénicos (36).

Serie 6XXX.- El elemento aleante es el Mg y el Si en proporciones adecuadas para formar el Mg_2Si para que sea tratable térmicamente. Estas aleaciones son menos resistentes que el resto de aleaciones, pero a cambio tiene soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión. Estas aleaciones pueden moldearse por un T4 y tiene aplicaciones en cuadros de bicicletas, pasamanos de los puentes, equipo de transporte y estructuras soldadas (36).

Serie 7XXX.- El elemento aleante es Zn añadido en proporciones que van desde el 1 al 8 %. A veces se añaden pequeñas cantidades de Mg para hacer a la aleación tratable térmicamente. Debido a que la principal propiedad de estas aleaciones es su alta dureza se suele usar en las estructuras de los aviones y equipos móviles (36).

En las aleaciones de aluminio-silicio, el silicio es el principal elemento aleante, sin embargo, estas aleaciones contienen cantidades menores de otros elementos, los cuales pueden ser clasificados como elementos mayores (silicio, cobre y magnesio) y menores (níquel, estaño); modificadores de la microestructura (titanio, boro, estroncio, berilio, manganeso y cromo) o impurezas (hierro y zinc) (37).

A continuación se mostrará un resumen en la Tabla 9, en donde se indica el sistema de designación de la Asociación del Aluminio en los Estados Unidos de Norte América (38).

Tabla 9 Sistema de designación y nomenclatura de la Asociación del Aluminio de los Estados Unidos (38).

Designación	Elemento aleante principal
1XXX	Composición controlada sin aleantes.
2XXX	Aleaciones de aluminio que contienen cobre como elemento de aleación principal.
3XXX	Aleaciones de aluminio-silicio que contienen además magnesio y/o cobre.
4XXX	Aleaciones binarias aluminio-silicio.
5XXX	Aleaciones de aluminio que contienen magnesio como elemento de aleación principal.
6XXX	Actualmente sin uso.
7XXX	Aleaciones de aluminio que contienen zinc como elemento de aleación principal.
8XXX	Aleaciones de aluminio que contienen estaño como elemento de aleación principal.
9XXX	Actualmente sin uso.

El sistema utilizado para las aleaciones de fundición es apenas diferente: el dígito que designa el grupo de aleación es esencialmente el mismo. Los segundos dos dígitos sirven para identificar una composición en particular. Con el cero después del punto decimal se identifica el producto como una fundición. La serie 3XX.X está reservada para las aleaciones que contienen silicio y/o adiciones de cobre y magnesio; la serie 6XX.X no es utilizada y la serie 8XX.X es utilizado para aleaciones que contienen estaño como el principal elemento aleante (38).

- **1XX.X:** Composiciones controladas sin aleantes.
- **2XX.X:** Aleaciones de Al que contienen Cu como elemento aleante principal.
- **3XX.X:** Aleaciones de Al-Si que contienen además Mg y/o Cu.
- **4XX.X:** Aleaciones binarias Al-Si.
- **5XX.X:** Aleaciones de Al que contienen Mg como elemento aleante principal.
- **6XX.X:** Actualmente sin uso.
- **7XX.X:** Aleaciones de Al que contienen Zn como elemento aleante, usualmente contienen Cu, Mg, Cr, Mn, o combinaciones de otros elementos.
- **8XX.X:** Aleaciones de Al que contienen Sn como elemento aleante principal.
- **9XX.X:** Actualmente sin uso.

2.4.6.4 Designación de la temperatura

Las propiedades mecánicas de las aleaciones se ven afectadas por su composición química y por la condición de su recocido, trabajado en frío o endurecido por precipitación. Es importante que esta condición sea clara e inequívocamente identificada para el diseñador y el ingeniero de soldadura. Para ello CEN ha desarrollado un sistema de sufijos que identifican la cantidad de endurecimiento por deformación que la aleación ha sido sometida o su condición de tratamiento térmico. Hay cinco denominaciones básicas identificadas por una sola letra que puede ser seguida por uno o más números para identificar la condición precisa. Las designaciones básicas son las siguientes: (35)

1. **F.-** Condiciones de fabricación. Se aplica a productos que adquieren algún temple como resultado de las operaciones de manufactura. No hay propiedades mecánicas especificadas para esta condición.

2. **O.-** Recocido, recristalizado. Es el temple más suave de los productos de aleación forjados.

El Al-comercial, Al-Mn y el Al-Mg sólo se pueden endurecer por deformación en frío (letra H), seguida o no de un recocido parcial o estabilización (ablandamiento) para minimizar las tensiones productos del estiramiento (trabajo en frío).

3. **H.-** Endurecido por deformación (trabajo en frío). La letra 'H' siempre es seguida por al menos dos dígitos para identificar la cantidad de trabajo en frío y los tratamientos térmicos que se han llevado a cabo para conseguir las propiedades mecánicas requeridas. El primer dígito indica la combinación específica de las operaciones básicas como sigue:

- a. H1.- Endurecidos por deformación solamente.
- b. H2.- Templado por deformación y luego recocido parcialmente. Se aplica a productos trabajados en frío para obtener un temple más duro y luego, mediante recocido parcial, bajar la resistencia al nivel deseado.
- c. H3.- Endurecido por deformación y luego estabilizado (a una temperatura relativamente baja respecto al recocido). Con esto se logran menores resistencias mecánicas y se gana ductilidad. Se aplica sólo a aleaciones que contienen Mg.

Un segundo dígito (X) indica el grado final de endurecimiento en general. Se designan con el número "0" el grado más bajo de dureza, el número "8" sería el totalmente duro y los temples extra duros se designan con el número "9". Entre estos extremos se tiene lo siguiente Tabla 10:

Tabla 10 Designación del grado de endurecimiento (35).

Número	Dureza
0	Más bajo
2	$\frac{1}{4}$ duro
4	$\frac{1}{2}$ duro
6	$\frac{3}{4}$ duro
8	Totalmente duro
9	Extra duro

4. **W.-** Tratamiento térmico en solución. Es un temple inestable que se aplica sólo a aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento térmico en solución. Debido al envejecimiento natural, esta designación es específica sólo cuando se indica el periodo de envejecimiento.
5. **T.-** Tratado térmicamente. Se aplica a productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación, para producir temples estables. La T sigue de los números 2 al 10, designando una combinación específica de operaciones básicas:
- a. **T2:** Recocido (sólo productos fundidos)
 - b. **T3:** Tratados térmicamente a solución y luego trabajada en frío.
 - c. **T4:** Tratados térmicamente a solución y envejecida en forma natural hasta una condición estable.
 - d. **T5:** Sólo envejecido artificial. Se aplica a productos envejecidos artificialmente después de un proceso de fabricación a alta temperatura seguido por enfriamiento rápido, tal como fundición o extrusión.
 - e. **T6:** Tratados térmicamente y en solución luego envejecida artificialmente.

- f. **T7:** Tratados térmicamente y en solución luego estabilizada: se aplica a productos en que las condiciones de temperatura y tiempo para estabilización son tales que la aleación se lleva más allá del punto de dureza máxima, proporcionando control de crecimiento de grano y/o esfuerzos residuales.
- g. **T8:** Tratados térmicamente, en solución trabajo en frío y luego envejecida en forma artificial.
- h. **T9:** Tratados térmicamente en solución, envejecida artificialmente y luego trabajo en frío.
- i. **T10:** Envejecida artificialmente y luego trabajada en frío, lo mismo que en T5, pero seguida por trabajo en frío a fin de mejorar la resistencia (35).

2.4.7 Composición química, propiedades físicas y mecánicas de la aleación 5052 y composición química del electrodo ER4043

A continuación, se observará en la Tabla 11 y

Tabla 12 la composición química y las propiedades físicas/mecánicas de la aleación 5052-H32 y en la Tabla 13 la composición química del ER4043.

Tabla 11 Límites de la composición química de la aleación 5052-H32 (26) (39), (40).

Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
5052-H32	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	---	0.05	remanente

Tabla 12 Propiedades físicas y mecánicas de la aleación 5052-H32 (41).

Aleación	Resistencia a la tensión		Resistencia a la cedencia		% Alargamiento	Dureza	
	MPa	KSI	MPa	KSI	%	Brinell	Vickers
5052-H32	228	33	193	28	12 %	60	83

Tabla 13 Límites de la composición química del electrodo ER4043 (42).

Electrodo	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
-----------	----	----	----	----	----	----	----	----	-----------------	----

ER4043	4.5-6.0	0.8	0.30	0.05	0.5	-	0.10	0.20	0.05	remanente
--------	---------	-----	------	------	-----	---	------	------	------	-----------

CAPÍTULO 3 Discusión y análisis de bibliografía

Después de realizar la revisión bibliográfica se observa que existen diferentes parámetros que influyen en la soldadura manual y automatizada, tales como: el gas de protección, el tipo de electrodo, voltaje y corriente, la velocidad de avance, el ángulo del electrodo, extensión del electrodo, entre otros.

En el año 2012 Morales, et. al. basaron su trabajo en el estudio realizado por el profesor Tabares, donde define que la zona afectada por el calor (ZAC por sus siglas en inglés) es la sección del material base en el que las propiedades mecánicas en cualquier material metálico, son afectadas por el arco durante el proceso de soldadura. Tabares propone que dependiendo de la cantidad de calor de entrada (sea mayor o menor), la magnitud de la ZAC aumentará o disminuirá conforme la temperatura en el material base. En las aleaciones de aluminio, las propiedades mecánicas son seriamente disminuidas por el efecto del calor de entrada al aplicar el proceso de soldadura; es más crítico para las aleaciones de la serie 5XXX debido a que son aleaciones no tratables térmicamente, comúnmente usadas en la industria marítima y cuyas propiedades mecánicas son atribuidas al magnesio el cual es su elemento aleante principal. Uno de los problemas más relevantes que se presentan en estas aleaciones son los esfuerzos residuales generados por un endurecimiento

por trabajo en frío provocando porosidades y discontinuidades. Además de los esfuerzos residuales, las porosidades y discontinuidades se pueden producir por la utilización de mezclas de gases de protección, por la falta del personal técnico calificado como soldador en este tipo de materiales y a la falta de actualización de las normas de competencias laborales para aplicaciones con la tecnología de GMAW - Pulsado (43). Ashton, et. al. en el año 1975 investigaron el efecto de la porosidad de la aleación 5086-H116 unida por GMAW, el cual es perjudicial para las propiedades del material (tensión y ductilidad). De tal manera, al aumentar la porosidad el límite de cedencia del material disminuye. En caso contrario, al disminuir la porosidad la propiedad de resistencia del material aumenta (44). Kumar, et. al. en el año 2009 utilizaron una lámina delgada de 1 mm de la aleación 6082 unido por AC P-GMAW, donde obtuvieron penetración insuficiente dando lugar a una excelente soldadura con buena apariencia, además de una alta calidad en donde la porosidad fue inferior al 1 % y la resistencia a la tensión fue más de 200 MPa (45).

Según Gene Mathers, la soldadura puede ser descrita como la unión de dos componentes por una coalescencia de las superficies en contacto entre sí (35). El proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW) es un proceso semiautomático o automático, donde un arco eléctrico es mantenido entre un alambre sólido que funciona como un electrodo continuo en la pieza de trabajo. Este proceso tiene diferentes modos de transferencia tales como el corto circuito, globular y spray, pero los equipos de soldadura de última generación enfocan sus tecnologías en el modo de transferencia de spray pulsado que tiene como ventaja soldar en todas las posiciones sin producir salpicaduras (22). Dicho lo anterior, en el año 2012 Romero, et. al. mencionan que el modo de transferencia pulsado se caracteriza por generar un pulso mediante una corriente base y una corriente pico, de tal manera que el valor de la corriente media está continuamente por debajo del umbral de la transferencia en spray, de esta forma se logra una penetración adecuada y un metal fundido con mayor fluidez (46). En 2005, Mendes, et al. mencionan que la razón por la cual se usó

GMAW-P es porque ha sido reconocida como una alternativa eficaz para minimizar la porosidad en la soldadura de aluminio (47). En 2006, L. -H Xu, et al. estudiaron la soldadura por arco en una aleación de aluminio 2519 utilizando un gas de protección mixto de Ar-He y un mixto ternario Ar-He-CO₂ cuyos resultados indican que en comparación de usar solo Ar, el número y el tamaño de los poros se reduce gracias al uso de la protección mixta de Ar-He, cuando el He alcanza el 70 % el número y tamaño de poros disminuye significativamente. Al utilizar el 1 % de CO₂ en el gas mixto se tendría Ar-He-CO₂, lo cual sería 30:69:1, se reduce aún más el número de poros (48). En el 2008, B.Y. Kang, et al. estudiaron la comparación del método convencional de suministro de gas de protección y un nuevo método que suministra alternativamente diferentes tipos de gas de protección en la zona de soldadura, las variaciones de porosidad y la forma de la soldadura de aluminio con el método de alimentación alternativa de argón puro y helio puro se compararon con el método de suministro de gas convencional con argón puro y la mezcla de argón + helio 67 %. Como resultado de la comparación de la soldadura se produjo menor grado de porosidad y la penetración fue más profundo y más amplio (49). En el 2007, M.D. Salvador, et al. mencionan que la influencia del tamaño de grano y el de los intermetálicos presentes resultan decisivos sobre las propiedades mecánicas del material después del rolado en frío (50).

CAPÍTULO 4 Conclusiones

De acuerdo a la revisión bibliográfica sobre la “Factibilidad del uso del proceso de soldadura GMAW semiautomatizado y robotizado en aleaciones de aluminio 5052-H32 con material de aporte ER4043” partiendo de los objetivos planteados en esta monografía, fue posible reunir información sobre el estado del arte en lo referente a la aleación de aluminio, gas de protección y proceso de soldadura. A continuación, se enumeran los aspectos más importantes:

1. En cualquier soldadura siempre habrán variables que afecten el perfil de soldadura, ya sea manual o automatizada tales como: el gas de protección, el tipo de electrodo, voltaje y corriente, la velocidad de avance, el ángulo del electrodo, extensión del electrodo, entre otros.
2. Dependiendo de la cantidad de calor de entrada que se utilizará (sea mayor o menor), el tamaño de la ZAC aumentará o disminuirá conforme la temperatura en cualquier material base.
3. La aparición de poros y de discontinuidades se pueden atribuir principalmente al uso de mezclas de gas de protección, a la limpieza del material antes de la soldadura y a la falta del personal calificado para unir este tipo de materiales.
4. El proceso GMAW-P es reconocido como una alternativa eficaz para minimizar la porosidad en la soldadura de aluminio.

5. Al utilizar un gas de protección mixto de Ar-He (30-70 %) y un mixto ternario Ar-He-CO₂ (30-69-1 %) el número y tamaño de los poros disminuyen al ser comparados sólo con el uso del Ar.

CAPÍTULO 5 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone realizar lo siguiente:

- Realizar un análisis en base a la regresión lineal de los datos para determinar los parámetros adecuados.
- Análisis Térmico Diferencial del metal base y del electrodo.
- Inspección de calidad de las uniones soldadas a tope por medio de ensayos destructivos (ED) y no destructivos (END).
- Realizar un estudio comparativo sobre la evolución microestructural resultante del proceso GMAW-P semiautomatizado y automatizado.

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de las actividades aplicadas sobre los procesos de soldadura (4).....	11
Tabla 2 Tipos de KR 16 y sus diferencias (19).	20
Tabla 3 Corrientes de transición de globular a spray para diversos electrodos (23).	31
Tabla 4 Metales de aporte que se usan comúnmente en las combinaciones de soldadura de arco de las aleaciones de aluminio (21) (26).....	37
Tabla 5 Guía para la selección de aleaciones de metal de aporte para soldar con arco diversas combinaciones de aleaciones de aluminio tratables térmicamente (21) (26).	41
Tabla 6 Metales de aporte adecuados para soldadura de arco GMAW, para uso general en diversas combinaciones de metales de base de aleaciones de aluminio (21) (26).....	43
Tabla 7 Voltajes de arco típicos para soldadura por arco GMAW de diversos metales ^a (23).....	46
Tabla 8 Métodos no destructivos (21).....	59
Tabla 9 Sistema de designación y nomenclatura de la Asociación del Aluminio de los Estados Unidos (38).	76
Tabla 10 Designación del grado de endurecimiento (35).....	79
Tabla 11 Límites de la composición química de la aleación 5052-H32 (26) (39), (40).	80
Tabla 12 Propiedades físicas y mecánicas de la aleación 5052-H32 (41).....	80
Tabla 13 Límites de la composición química del electrodo ER4043 (42).....	80

Índice de Figuras

Figura 2. 1 Soldadura manual (5).	12
Figura 2. 2 Máquina de soldadura con alimentador automático de electrodo (6).	13
Figura 2. 3 Soldadura robótica automatizada (7).	13
Figura 2. 4 Diferentes tipos de robots A) Robot con control manual (9), B) Robot con control automático (10), C) Robot programable (11) y D) Robot que se adapta al entorno de trabajo (12).	15
Figura 2. 5 Ilustración de la estructura mecánica de un robot (14).	16
Figura 2. 6 Actuador eléctrico (15).	17
Figura 2. 7 Sensor de posición lineal sin contacto. (16).	18
Figura 2. 8 Unidad de control KR C2.	18
Figura 2. 9 Antorcha de soldadura por arco eléctrico (17).	19
Figura 2. 10 Partes de brazo robótico industrial KUKA KR16 (18).	20
Figura 2. 11 Desplazamiento específico de cada uno de los ejes A1 - A6 (18).	21
Figura 2. 12 Diagrama maestro de los procesos de soldadura (21).	23
Figura 2. 13 Proceso de soldadura GMAW (23).	27
Figura 2. 14 Esquema representativo del equipo para soldadura por arco GMAW (23).	28
Figura 2. 15 Característica de corriente de soldadura de arco de spray a pulsos (23).	32
Figura 2. 16 Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura (23).	35
Figura 2. 17 Terminología de soldadura por arco de metal y gas (23).	46
Figura 2. 18 Corriente de soldadura típica contra velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero al carbono (23).	48
Figura 2. 19 Corrientes de soldadura típicas contra velocidades de alimentación de alambre para electrodos de acero al carbono (23).	49
Figura 2. 20 Corrientes de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de aluminio ER4043 (23).	49
Figura 2. 21 Corrientes de soldadura típicas contra velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300 (23).	50
Figura 2. 22 Corriente de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de cobre ECu (23).	50
Figura 2. 23 Eficiencias de las fuentes de calor en algunos procesos de soldadura (27).	52
Figura 2. 24 Máquina donde se lleva a cabo la prueba de tensión (31).	53
Figura 2. 25 Curva esfuerzo-deformación ingenieril (32).	54
Figura 2. 26 Ilustración del ensayo de dureza Brinell (33).	55

Figura 2. 27 Penetrador Vickers (33).....	56
Figura 2. 28 Las tres formas cristalinas de los metales: (a) cúbica centrada en el cuerpo; (b) cúbica centrada en las caras; (c) hexagonal compacta (35).....	61
Figura 2. 29 Relación general del tamaño de grano con la resistencia, ductilidad y tenacidad (35).	62
Figura 2. 30 Ilustración del efecto del trabajo en frío en la resistencia, dureza y ductilidad (35).	63
Figura 2. 31 Porosidad finamente distribuida en una placa de 6mm de espesor unido por soldadura TIG a tope. (35)	64
Figura 2. 32 Solubilidad del hidrógeno en el aluminio puro (35).	65
Figura 2. 33 Atrapamiento de óxido en la soldadura por filete (35).....	66
Figura 2. 34 Solidificación de un metal (35).....	68
Figura 2. 35 Efecto de la concentración de soluto en la sensibilidad del agrietamiento (35).....	69

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Velocidad de alimentación del electrodo. (23).....	48
Ecuación 2 Eficiencia de la fuente de calor (27).	51
Ecuación 3 Eficiencia de la fuente de calor con arco (27).	51
Ecuación 4 Entrada de calor por unidad de longitud de la soldaduras con arco (28).	52
Ecuación 5 Dureza Brinell (33) (30).	55
Ecuación 6 Ecuación de microdureza Vickers (33).....	56
Ecuación 7 Límite de elasticidad (35).	62

Bibliografía

1. aluar. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] http://www.aluar.com.ar/es/aluminio.php?id_categoria=55.
2. **A3:2001, AWS.** *Committee on definitions, Standard Welding Terms and Definitions.* Miami, USA : American Welding Society (AWS), 2001.
3. **Cary, H.B.** *Modern Welding Tecnology.* 3° Edition. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, 1994.
4. **Handbook, Welding.** *Welding Science & Technology.* 9°. Miami : s.n., 2001. págs. 452-482. Vol. 1.
5. STP. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] <http://stp.insht.es:86/stp/basequim/007-soldadura-al-arco-el%C3%A9ctrico-con-electrodo-met%C3%A1lico-revestido-exposici%C3%B3n-humos-met%C3%A1licos>.
6. Direct industry. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] http://www.directindustry.com/prod/lincoln-electric-7970.html#product-item_1571587.
7. CONACYT. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] <http://centrosconacyt.mx/objeto/soldadura-robotica-automatizada/>.
8. **A. Barrientos, L.F. Peñín, C. Balaguer, R. Aracil.** *Fundamentos de robótica.* Madrid : McGraw-Hill, 1997.
9. hotfrog. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2016.] <http://www.hotfrog.es/empresa//manipulador-industrial-para-discos-de-flejes-31336>.
10. festo-didactic. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2016.] <http://www.festo-didactic.com/es-es/productos/mps-sistema-de-produccion-modular/estaciones/estacion-de-manipulacion,neumatico-un-todoterreno-con-actuador-lineal-neumatico.htm?fbid=ZXMuZXMuNTQ3LjE0LjE4LjYwNi4zOTQ2>.
11. yourmecatronica. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2016.] <https://yourmecatronica.blogspot.mx/2014/07/la-robotica.html>.
12. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2016.] <http://new.abb.com/products/robotics/es/robots-industriales/yumi>.

13. **Baturone, Aníbal Ollero.** *Robótica Manipuladores y robots móviles.* s.l. : Alfaomega, 2001. 84-267-1313-0.
14. **Víctor R.González Fdez, Antonio López Cruzado, José A. Cabero Esteban.** Control y Robótica. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/index.htm.
15. BricoGeek. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] <http://tienda.bricogeek.com/24-motores-paso-a-paso>.
16. Direct industry. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] <http://www.directindustry.es/prod/mts-sensor-technologie/product-16777-487773.html>.
17. Direct Industry. [En línea] 2016. [Citado el: 30 de 10 de 2016.] <http://www.directindustry.es/prod/aro/product-8013-1229069.html>.
18. **Inali.** inali.com. [En línea] 21 de Abril de 2016. [Citado el: 21 de Abril de 2016.] http://www.inali.com/catalogos/curso_robot.pdf.
19. kuka-robotics. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] http://www.kuka-robotics.com/mexico/es/products/industrial_robots/special/arc_welding_robots/kr_16_arc_hw/.
20. **GmbH, KUKA Roboter.** Instrucciones de manejo y programación para el usuario. Augsburg : s.n., 2010. s.n.
21. *Soldadura: Aplicaciones y práctica.* **Henry Horwitz, P. E.** Boston : Alfaomega, 1976. 0-395-24473-0.
22. **García, Roberto Escalona.** *Manual de Soldadura.* [ed.] R.L.O' Brien. Octava. s.l. : American Welding Society, 1996. Vol. 1. 0-87171-354-3.
23. **Society, American Welding.** *Manual de Soldadura.* [ed.] R. L. O' Brien. Octava. México : Pearson Educación, 1996. Vol. 2.
24. Slide share. [En línea] 30 de 11 de 2015. [Citado el: 30 de 11 de 2015.] <http://es.slideshare.net/juanmurillovalencia/teoria-y-fundamentos-gmaw-22727955>.
25. **D.D. Rager, D.K. Miller, A.W. Sindel.** *AWS D1.2/D1.2M: Structural Welding Code-Aluminum.* Cuarta. Miami : American National Standards Institute, 2003. 0-87171-704-2.

26. **Rafael Menezes Nunes, Bruno L. Alia, Richard L. Alley, William Ballis.** *ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering.* s.l. : ASM International, 1993. Vol. 6. 0-87170-377-7.
27. **KOU, SINDO.** WELDING METALLURGY. WISCONSIN : A JOHN WILEY & SONS, INC, 2003. pág. 455. 0-471-43491-4.
28. *Key concepts in welding engineering.* **Funderburk, Scott.** 1, s.l. : Welding Innovation, 1999, Vol. XVI.
29. La web de los adhesivos. [En línea] 24 de 11 de 2015. [Citado el: 24 de 11 de 2015.] <http://www.losadhesivos.com/ensayos-destructivos.html>.
30. **Galindo, Ing. Christian.** Ciencia de los Materiales. Saltillo : s.n., 2015 de Noviembre de 2015.
31. **Garavito, Julio.** [En línea] 24 de 11 de 2015. [Citado el: 24 de 11 de 2015.] <http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/protocolos/MATE/tension.pdf>.
32. **Arroyo, Dra. Rita Muñoz.** *Metalurgia de la soldadura.* Saltillo : COMIMSA, 18 de Octubre de 2015.
33. Ensayo de dureza. [En línea] 24 de 11 de 2015. [Citado el: 24 de 11 de 2015.] http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/ptrb2_2_6.html.
34. *Calidad en la soldadura: Inspección y detección con ensayos no destructivos.* **Rojas, Paola Andrea Ruiz.** Pereira : Metal actual, 2010.
35. **Mathers, Gene.** *The welding of aluminium and its alloys.* s.l. : Woodhead Publishing, 2002. 1855735679.
36. Ingeniería de materiales. [En línea] 17 de 04 de 2009. [Citado el: 17 de 10 de 2015.] <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>.
37. *Review on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy composites.* **R. S. Rana, R. Purohit, S. Das.** s.l. : International journal of scientific and research publications, 2012. 2250-3153.
38. **J. E. Gruzleski, B. M. Closset.** *The treatment of liquid Aluminum-Silicon alloys.* Illinois : American foundrymen's society., 1990.
39. **International, ASTM.** Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate B 209M. United States : ASTM International, 2006.

40. **George E. Totten, G. Scott MacKenzie.** *Handbook of Aluminum: Alloy Production and Materials Manufacturing.* New York : Marcel Dekker. Vol. 2.
41. Alcoa. [En línea] 21 de 04 de 2016. [Citado el: 21 de 04 de 2016.] <http://www.alcoaconsumerelectronics.com>.
42. **(AWS), American Welding Society.** AWS A5.10/5.10M:1999 Specification for Bare Aluminum and Aluminum-Alloy Welding Electrodes and Rods. 2007.
43. *Caracterización del Aluminio 5083 H116 soldado con el Proceso GMAW Pulsado.* **Alfredo Morales, Robert Muñoz, Alfonso Patarroyo, Fernando Rojas, Diana Aragón.** 1, Colombia : s.n., 2012, Vol. 9.
44. *El efecto de la porosidad en la aleación 5086-H116 soldados.* **R.F. Ashton, R.P. Wesley y C.R. Dixon.** Virginia : s.n., Marzo de 1975.
45. *Soldadura de una placa delgada de una aleación de aluminio 6082 por AC pulsado-GMAW y AC onda de pulso-GMAW.* **Rakesh Kumar, Ulrich Dilthey, D.K. Dwivedi y P.K. Ghosh.** 30, Roorkee y Aachen : Elsevier, 7 de Mayo de 2008.
46. *Influencia de la transferencia por arco sobre la microestructura de uniones soldadas usando arco pulsado.* **Sandra Patricia Romero-Nieto, Jhon Jairo Olaya-Flórez.** 1, Colombia : Ingeniería Mecánica, 2012, Vol. 16. 1815-5944.
47. *La influencia del doble pulsado GMAW en la formación de porosidad en el aluminio.* **Celina Leal Mendes da Silva, Américo Scotti.** Belem : Elsevier, 7 de Julio de 2005, Materials Processing Technology.
48. *Efectos de gas de protección en la microestructura y el número de poros de gas en aleaciones de aluminio de soldadura de alta resistencia.* **L. -H. Xu, Z. -L.Tian, X. -M. Zhang y yu yi peng.** Noviembre de 2006.
49. *Características de la fuente alternativa de gases de protección en la soldadura de aluminio GMAW.* **B.Y. Kang, Yarlagadda K.D.V. Prasad, M.J. Kang, H.J. Kim, I.S. Kim.** Corea : Elsevier, 2008, Journal of Materials Processing Technology.
50. *Evolución microestructural y mecánica de una aleación de aluminio de la serie 3XXX obtenida por el proceso Hazelett.* **M.D. Salvador, V. Amigó, L. Reig, C. Bloem, M. Carsí y G. Caruana.** 43, Noviembre de 2007, Revista de metalurgia. 0034-8570.
51. BBC. [En línea] [Citado el: 30 de 10 de 2016.] <http://www.bbc.co.uk/education/guides/zfsk7ty/revision/3>.