



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería Química
Colegio de Ingeniería en Materiales

“Propuesta de una Práctica de Soldadura de Aluminio: Consideraciones Técnicas y Metodológicas”

Tesina

para obtener el título de:

Licenciada en Ingeniería en Materiales

Presenta:

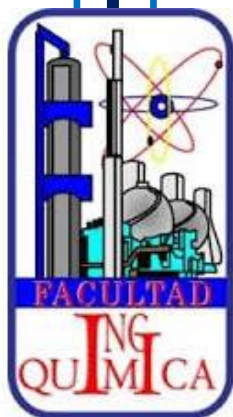
Alejandrina Martínez Fernández de Lara

Matrícula:

201530195

Director de tesina:

Dr. José Humberto Camacho García



Puebla, Pue. Septiembre de 2025.



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/131/2025
Asunto: Registro de Tema de Tesina

C. ALEJANDRINA MARTÍNEZ FERNÁNDEZ DE LARA
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA EN MATERIALES
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesina de la Licenciatura en Ingeniería en Materiales cuyo título es el siguiente:

"Propuesta de una Práctica de Soldadura de Aluminio: Consideraciones Técnicas y Metodológicas"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesina: Dr. José Humberto Camacho García.

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 21 de agosto de 2025

Dr. Rubén Jonatan Aranda García
Secretario Académico



C.c.p. Director de Tesina: Dr. José Humberto Camacho García.
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

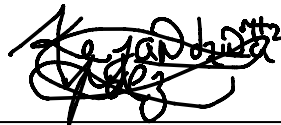
Av. San Claudio s/n, Col. San
Maniel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

Carta de Autorización

El que suscribe, C. Alejandrina Martínez Fernández de Lara, autoriza por medio del presente escrito a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada “Propuesta de una Práctica de Soldadura de Aluminio: Consideraciones Técnicas y Metodológicas” la cual soy autor y titular de los derechos de autor. La finalidad del uso por parte de la BUAP de la tesis antes mencionada será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a Bibliotecas BUAP y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional. Por lo antes manifestado, libero a la BUAP de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización:

Autorizó:



Alejandrina Martínez Fernández de Lara

3 de septiembre de 2025

Dedicatoria

A mi familia por todo su apoyo y paciencia.

A mis padres Víctor Antonio Martínez Donis y María de los Ángeles Alejandrina Fernández de Lara Jiménez, a mi hermano Antoine que siempre estuvo presente ayudándome, a Baruch por escucharme, a Eloisa por siempre alentarme.

Y a mi esposo el Dr. Uvencio Giménez por su apoyo.

Agradecimientos

A mi asesor el Dr. José Humberto Camacho García, por su ayuda y conducción durante el desarrollo de esta tesina.

A mis sinodales el Dr. Heriberto Cocoltzi Hernández y la M.I. Carolina Osnaya Gamboa por su apoyo y guía.

A mis compañeros y amigos que me acompañaron y brindaron apoyo durante estos años de carrera, especialmente a Jesús Guillermo Martínez, Juan Pablo Bautista, Ana Carmona, Amairani Barragán y Pablo Zarza.

Al Dr. Jorge Velázquez Castro, a la Dra. Ana Avilés López, al Dr. José Jacobo Oliveros Oliveros, a la Dra. María Corazón Flores Bautista, al Dr. Ignacio Barradas e Ingrid Barradas que me impulsaron a seguir amando la ciencia.

A mis gatitos por quedarse conmigo en las madrugadas mientras escribía, Merlín, Mushu, Miel, Salem, Totopo y Calabaza.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por ser pilar esencial para culminar esta etapa.

Índice

Contenido

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Listas de tablas y figuras	vii
Capítulo 1 “Marco teórico”	1
1.1. El Aluminio: origen, propiedades y aplicaciones industriales	1
1.2 Cuales son los tipos de aluminio y como se clasifican.....	2
1.3. La soldadura en la industria moderna y sus ventajas	4
1.4. Procesos de soldadura de aluminio y sus desafíos.....	5
1.5. Aspectos académicos y de seguridad en la soldadura	6
Objetivos	7
Hipótesis	7
Capítulo 2 “Fundamentos teóricos”	8
2.1 Soldadura	8
2.2 Breve historia y desarrollo de las técnicas de soldadura por arco	8
2.3 Evolución de la soldadura por arco eléctrico y la protección del baño fundido	11
2.4 Principios del sistema de soldadura por arco eléctrico	12
2.5 Avances en la soldadura con atmósferas gaseosas	12
2.6 Diversificación de la soldadura y su impacto industrial	14
2.7 Tipos de soldadura	15
2.8 Procesos de soldadura.....	16
2.9 Soldadura por TIG.....	17
2.10 Soldadura MIG	18
2.11 Principios de la soldadura SMAW	21
2.12 Soldadura SMAW	22
2.13 Tipos de máquinas de soldadura por arco eléctrico	23
2.13.1 Máquinas de corriente alterna (CA):	23
2.13.2 Máquinas de corriente continua (CC):.....	23
2.14 Características y designación de los electrodos revestidos	24
2.15 Caligrafía de soldadura y sus beneficios.....	26
2.16 Variables que afectan la calidad de la soldadura	28
2.17 Normativas	32

2.18 Errores comunes al soldar y cómo identificar la calidad de la soldadura.....	33
Capítulo 3 “Resultados”	36
3.1 Propuesta de procedimiento experimental.....	36
3.2 Recomendaciones	39
Conclusiones	40
Bibliografía	41

Listas de tablas y figuras

Tabla 1: Series del aluminio, principales aleantes, características y aplicaciones [4].	3
Tabla: 2 Principales problemas de soldadura, causas y soluciones [19].	33
Figura 1: Soldadura en una atmósfera de gas protector [18].	11
Figura 2. Arco entre dos electrodos [18].	13
Figura 3: Procesos de soldadura por fusión [19].	15
Figura 4: Procesos de soldadura por fusión y presión, resistencia y contacto [19].	16
Figura 5: Procesos de soldadura por fase sólida [19].	16
Figura 6: Esquema de un soplete para soldadura TIG [Haynes Techbook Welding Manual] [18]...	18
Figura 7: Variación del amperaje y su influencia en las gotas de soldadura [Open House] [18].	20
Figura 8: Esquema del arco eléctrico empleado en la soldadura por arco eléctrico [22].	21
Figura 9: Forma en que ocurre la ionización del arco eléctrico [22].	22
Figura 10: Instalación de soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido [22].	23
Figura 11 Identificación de electrodos, biblioteca chile, ENDESA, curso: inspección de soldaduras [23].	26
Figura 12: Partes que conforman un bisel [21].	31

Capítulo 1 “Marco teórico”

La soldadura de aluminio representa un área especializada dentro de la ingeniería de materiales debido a sus características particulares. Para comprender a fondo los desafíos y las oportunidades en este campo, es fundamental entender primero la naturaleza del aluminio, la evolución de los procesos de soldadura y su relevancia actual.

1.1. El Aluminio: origen, propiedades y aplicaciones industriales

El aluminio (Al), es un metal no ferroso de apariencia plateada y notable ligereza, y además es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre. Su historia industrial se remonta a 1825, con su aislamiento por Hans Christian Oersted, y su consolidación como metal industrialmente viable a partir de 1886, gracias al desarrollo simultáneo del proceso de extracción a partir de la bauxita por Paul Héroult (Francia) y Charles M. Hall (Estados Unidos). Este método, que implica la separación del óxido de aluminio (alúmina) y su posterior reducción electrolítica en criolita a altas temperaturas, sigue siendo la base del proceso industrial moderno [1].

El aluminio destaca por una combinación de propiedades que lo hacen indispensable en diversas industrias. Su excelente relación resistencia-peso lo convierte en un material ideal para sectores como el aeroespacial y el automotriz, donde la reducción de masa es crítica para la eficiencia. Además, posee una alta conductividad eléctrica y térmica, características que lo hacen valioso en aplicaciones eléctricas, electrónicas y en sistemas de intercambio de calor. Su resistencia a la corrosión es intrínseca, gracias a la rápida formación de una capa protectora de óxido en su superficie, lo que lo hace adecuado para ambientes exigentes como la construcción naval y estructuras expuestas.

La maleabilidad y ductilidad del aluminio facilitan enormemente su procesamiento y conformación. Otro atributo fundamental es su alta reciclabilidad, permitiendo su reutilización indefinida sin pérdida significativa de propiedades, lo que lo posiciona

como un material clave para la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental, especialmente considerando la alta energía requerida para su obtención primaria a partir de la bauxita [2]. A diferencia de los metales ferrosos, el aluminio es no magnético, lo que lo hace valioso en aplicaciones donde se debe evitar la interferencia magnética. Sus propiedades pueden mejorarse significativamente al generar aleaciones con otros elementos como cobre, manganeso, magnesio, silicio y zinc, ampliando su rango de aplicaciones y consolidándolo como un material esencial en la construcción, electrónica y fabricación de envases [3]. La elección de la aleación de aluminio adecuada dependerá siempre de los requisitos particulares del proyecto o aplicación.

1.2 Cuales son los tipos de aluminio y como se clasifican

El aluminio puro posee aplicaciones limitadas en su estado elemental. Por ello, se le combina frecuentemente con otros elementos como silicio, magnesio y manganeso para formar aleaciones, las cuales son excepcionalmente versátiles y se encuentran presentes en prácticamente todos los aspectos de la vida moderna. La adición de distintos elementos en proporciones variadas permite obtener una amplia gama de propiedades físicas y químicas deseables, adaptándose a múltiples usos industriales.

Para estandarizar y regular la composición, propiedades y nomenclatura de estas aleaciones, la Asociación del Aluminio (AA), con sede en Estados Unidos de América, ha establecido especificaciones rigurosas. Existen dos categorías principales de aleaciones de aluminio: las forjadas y las fundidas. La diferencia fundamental reside en sus procesos de formación, lo cual impacta significativamente sus características finales.

Las aleaciones se clasifican y nombran según la cantidad y el tipo de los metales aleantes. La convención de nomenclatura de la AA para estas aleaciones fundidas adopta un formato de cuatro dígitos, con el tercero y el cuarto separados por un punto decimal (XXX.X). El primer dígito es el más significativo, ya que indica los metales aleantes principales para cada aleación de aluminio, permitiendo diferenciar entre distintas "series" o "grados" de aleación. Por ejemplo, todas las

aleaciones de aluminio que comienzan con un '2' se conocen como series 2xx.x o aleaciones de grado 2xx.x. Este primer dígito puede ser cualquier número del 1 al 8, con la excepción del 6, que no se utiliza para las aleaciones fundidas [4].

Por otro lado, las aleaciones de aluminio forjado se obtienen al combinar aluminio fundido con otros metales. Sin embargo, a diferencia de las aleaciones fundidas, estas adquieren su forma definitiva a través de procesos mecánicos como la extrusión, el laminado o el doblado, una vez que el metal se ha solidificado en lingotes o barras. Su sistema de clasificación y nomenclatura también es similar, pero específico para esta categoría. Se organizan en series según los principales elementos aleantes y su convención utiliza cuatro dígitos sin punto decimal.

Tabla 1: Series del aluminio, principales aleantes, características y aplicaciones [4].

Series	Principales elementos aleantes	Características principales	Aplicaciones
1.xxx	99.xx% aluminio puro	Alta conductividad térmica y eléctrica, baja resistencia mecánica.	Conductores eléctricos.
2.xxx	Cobre	Alta resistencia mecánica, baja resistencia a la corrosión.	Industria aeroespacial y automotriz.
3.xxx	Manganeso	Alta resistencia a la corrosión, buenas propiedades mecánicas.	Utensilios de cocina, techos, latas.
4.xxx	Silicio	Bajo punto de fusión, buena resistencia al desgaste.	Soldadura, componentes automotrices.
5.xxx	Magnesio	Alta resistencia a la corrosión, buena soldabilidad.	Estructuras marinas, tanques, transporte.
6.xxx	Silicio y magnesio	Alta resistencia, soldabilidad, resistencia a la corrosión.	Estructuras, ventanas, cuadros de bicicleta.
7.xxx	Zinc	Altísima resistencia mecánica, baja soldabilidad.	Aviación, equipo deportivo de alto rendimiento.

La tabla 1 detalla los principales elementos aleantes de cada una de las series de aluminio forjado, destacando sus características clave y algunas de sus aplicaciones más comunes, donde el primer dígito indica, igualmente, la serie y sus principales elementos aleantes.

1.3. La soldadura en la industria moderna y sus ventajas

El crecimiento continuo de la producción mecánica y de las construcciones en México, en línea con los planes de desarrollo de la economía nacional, exige la aplicación de procesos de soldadura y corte de metales cada vez más eficientes, así como un incremento en su mecanización y automatización. Se ha logrado un progreso considerable en la sustitución de construcciones remachadas, fundidas y forjadas por estructuras soldadas, que resultan más sencillas y económicas. Esto ha impulsado el desarrollo de talleres especializados para la elaboración centralizada de estructuras soldadas y la introducción de técnicas de rellenado con materiales resistentes al desgaste, permitiendo la recuperación de máquinas y piezas para alargar su vida útil, además de implementar métodos de soldadura de alta productividad.

La soldadura, como proceso tecnológico, se ha consolidado indiscutiblemente en todos los campos de las construcciones metálicas. Su adopción ha hecho posible la creación de diversas estructuras, equipos y mecanismos que antes eran inviables. Esto se atribuye a una serie de ventajas significativas que incluyen una notable reducción de los tiempos de ejecución, un aumento de la productividad y un ahorro de materiales [5].

Las principales ventajas de los procesos de soldadura son:

- Economía de material: un ahorro de hasta el 25% en comparación con el remachado.
- Reducción de los tiempos y costos de fabricación.
- Posibilidad de fabricar piezas de gran tamaño a partir de componentes o semiproductos más pequeños.
- Capacidad de reparación y corte de piezas.
- Aumento de la productividad.
- Bajo costo del equipamiento tecnológico.
- Uniones herméticas.

- Mejora de las condiciones de trabajo al eliminar ruidos.

Además, la relevancia de la soldadura en el diseño de tecnologías de restauración y recuperación de piezas permite no solo la construcción de nuevos elementos, sino también extender la vida útil de componentes existentes. La calidad de una soldadura está intrínsecamente ligada al tipo de metal utilizado, ya que todos los metales reaccionan al calor con expansión y ablandamiento, principios fundamentales del proceso. Conocer las propiedades y clasificaciones de los metales facilita la elección adecuada para cada proyecto de soldadura, garantizando resultados de calidad. La selección correcta de materiales es crucial para el éxito final del trabajo, al igual que la consideración de los recursos necesarios para su ejecución.

1.4. Procesos de soldadura de aluminio y sus desafíos

Dentro de los procesos de soldadura, los de fusión son los más utilizados, representando aproximadamente el 75% de las uniones soldadas globalmente. Estos procesos emplean la descarga de un arco eléctrico como fuente de energía principal entre dos electrodos (fusibles o infusibles, revestidos o desnudos), donde la pieza a soldar frecuentemente actúa como uno de los electrodos.

Los procesos más comunes para soldar aluminio incluyen la Soldadura por arco con gas (Tungsten Inert Gas, TIG, por sus siglas en inglés), Soldadura por arco con gas metálico, (Metal Inert Gas, MIG, por sus siglas en inglés) y Soldadura por arco eléctrico manual de electrodo revestido, (Shield Metal Arc Welding, SMAW, por sus siglas en inglés) y métodos más recientes como la soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés). La soldadura TIG se caracteriza por ofrecer alta calidad y control en la unión, ideal para aplicaciones delgadas, mientras que MIG permite una mayor productividad en piezas más gruesas [6]. Por su parte, SMAW es uno de los procesos de soldadura más utilizados a nivel mundial debido a su simplicidad, bajo costo, portabilidad del equipo y versatilidad. Este proceso consiste en la generación de un arco eléctrico entre un electrodo revestido y la pieza de trabajo, lo que provoca la fusión de ambos para formar la unión. Su adaptación a la soldadura de aluminio presenta consideraciones

particulares, siendo la elección del proceso dependiente del tipo de aleación, el espesor del material y los requerimientos del producto final [7].

Entre los principales problemas que se presentan al soldar aluminio se encuentran la porosidad, las grietas en caliente y la distorsión por calor. Estos efectos se deben a la rápida conducción térmica del material y a su reactividad química. Además, la capa de óxido superficial debe ser removida antes del proceso para evitar defectos en la unión. Por ello, la preparación del material y el control de parámetros como la corriente, el gas protector y la velocidad de avance son fundamentales [8].

1.5. Aspectos académicos y de seguridad en la soldadura

En el ámbito académico, las prácticas de laboratorio permiten a los estudiantes aplicar conocimientos teóricos en un entorno controlado. Diversas universidades han desarrollado guías prácticas enfocadas en procesos de soldadura; sin embargo, el aluminio suele ser menos abordado por requerir equipos específicos y un mayor nivel de complejidad. Por tanto, se considera necesario diseñar una propuesta que integre criterios técnicos, pedagógicos y de seguridad, adaptados a los recursos disponibles en instituciones educativas [9].

Es fundamental recordar que toda actividad de soldadura implica riesgos como exposición a radiación UV, inhalación de humos metálicos, quemaduras y riesgo eléctrico. La norma AWS Z49.1 establece lineamientos claros para garantizar la seguridad del personal y del entorno en actividades de soldadura [10]. En el contexto académico, es crucial incluir procedimientos de seguridad en toda práctica experimental, tanto para proteger a los estudiantes como para formar una cultura preventiva en el ejercicio profesional [11].

Objetivos

Objetivo general

Elaborar una propuesta teórica de una práctica de soldadura de aluminio. Esta incluirá consideraciones técnicas y metodológicas para demostrar su viabilidad con el equipo de laboratorio actual, sentando así las bases para mejorar la formación de futuros ingenieros de materiales.

Objetivos particulares:

- Realizar una investigación bibliográfica exhaustiva de las distintas técnicas de soldadura, con un enfoque particular en la soldadura de aluminio por el proceso SMAW.
- Analizar y documentar los requerimientos de seguridad y las condiciones de operación ideales necesarios para realizar la práctica experimental de soldadura de aluminio de manera efectiva y segura.
- Definir y especificar los materiales, equipos y recursos complementarios que serían necesarios para la implementación de la práctica experimental de soldadura de aluminio.

Hipótesis

Es posible sentar las bases teóricas para la implementación de una práctica experimental de soldadura de aluminio en el programa de Ingeniería de Materiales, lo que potencialmente mejorará las competencias técnicas de los estudiantes en el manejo de materiales no ferrosos una vez que dicha práctica sea desarrollada y ejecutada.

Capítulo 2 “Fundamentos teóricos”

2.1 Soldadura

La soldadura es un proceso tecnológico de vital importancia en la actualidad, a menudo subestimado por el público en general a pesar de ser un pilar fundamental en la mayoría de las construcciones modernas.

Antiguamente, la soldadura se definía de manera simplista como la unión de metales mediante calor hasta su estado de fusión. Sin embargo, con la evolución de las técnicas, esta definición se ha expandido. Actualmente, se distinguen dos formas básicas: la soldadura por fusión y la soldadura en estado sólido (sin fusión). La soldadura por fusión es la más común y se caracteriza por la fundición de los metales base que se desean unir.

Por otro lado, la soldadura sin fusión, representada por procesos como la soldadura blanda (estañado) y la soldadura fuerte (latón), involucra el calentamiento de los materiales base sin que estos alcancen su punto de fusión. En estos procesos, lo que se funde es el metal de aporte, que al enfriarse forma una unión robusta. Adicionalmente, la presión y la fricción por sí solas pueden generar uniones metálicas. En un sentido más amplio, el término "soldadura" se ha extendido incluso a la unión de materiales no metálicos, como en la soldadura plástica, que puede implicar la fusión del material debido a la aplicación de calor o reacciones químicas [16].

2.2 Breve historia y desarrollo de las técnicas de soldadura por arco

Determinar el momento exacto y el país de origen de ciertas técnicas de soldadura es un desafío, dada la experimentación simultánea y continua en diversas regiones. Aunque el trabajo con metales se remonta a siglos, los métodos modernos de soldadura datan principalmente del inicio del siglo XIX, con hitos clave en el desarrollo del arco eléctrico y el uso de gases protectores:

- 1801: El inglés Sir H. Davy descubre la capacidad de generar y mantener un arco eléctrico entre dos terminales.

- 1835: E. Davey, en Inglaterra, descubre el gas acetileno, cuya fabricación era inicialmente muy costosa. No es hasta 1892 que el canadiense T. L. Wilson desarrolla un método económico para su producción.
- 1895: El francés H. E. Chatelier descubre la combustión del oxígeno con el acetileno.
- 1900: Los franceses E. Fouch y F. Picard desarrollan el primer soplete de oxiacetileno, marcando un avance significativo.

El desarrollo de la soldadura por arco eléctrico también tuvo un progreso notable:

- 1881: El francés De Meritens logra soldar diversas piezas metálicas utilizando con éxito un arco eléctrico entre carbones, alimentado por acumuladores de plomo. Este hito sentó las bases para el reemplazo del caldeoado en fragua.
- 1885: Los ingenieros rusos S. Olczewski y F. Bernardos logran la unión por fusión de dos piezas metálicas, utilizando corriente continua y un arco generado entre la punta de una varilla de carbón (conectada al polo positivo) y las piezas a unir (conectadas al polo negativo). Este proceso generaba calor suficiente para la fusión y posterior unión mecánica de los metales. Sin embargo, la dificultad para controlar la irregularidad del arco limitaba su eficiencia.
- Mejoras en la polaridad: La inversión de la polaridad de los electrodos (pieza conectada al positivo) resultó en una notable mejora, ya que el arco se generaba de manera más controlada y localizada en la punta del electrodo de carbón, facilitando la unión precisa.
- 1889: El físico alemán, Dr. H. Zereener, buscando una mayor estabilidad del arco, experimenta con la soldadura por arco eléctrico entre dos electrodos de carbón. Para controlar el arco inestable, introduce un electroimán que lo dirige magnéticamente (efecto de soplado), una técnica aún aplicada en procesos automáticos para chapas delgadas. La facilidad de regulación del flujo del arco se lograba variando la corriente de excitación del electroimán.

- 1891: Ante el excesivo consumo de electrodos de carbón y la necesidad de simplificar los equipos, el ingeniero ruso N. Slavianoff introduce el uso de electrodos de metal (electrodos de hierro sin recubrir). Este cambio fundamental mejoró la calidad metalográfica de las uniones al evitar la inclusión de partículas de carbón en el metal fundido.
- 1892: El método Slavianoff es mejorado por el estadounidense C. L. Coffin, quien desarrolla la soldadura por puntos. Este método, en esencia, sigue siendo la base de la soldadura por arco utilizada en la actualidad.

La preocupación por la acción nociva de la atmósfera (oxidación acelerada por el calentamiento) sobre los electrodos sin recubrir durante la formación del arco llevó a los investigadores a buscar soluciones. Una de las primeras experiencias en este sentido fue realizada por Alexander Nikolayevich, quien propuso eliminar el oxígeno que rodeaba el arco, realizando la soldadura en una atmósfera de gas protector, donde se protege el metal base a soldar, el electrodo y el arco, mediante un suministro constante de gas [17].

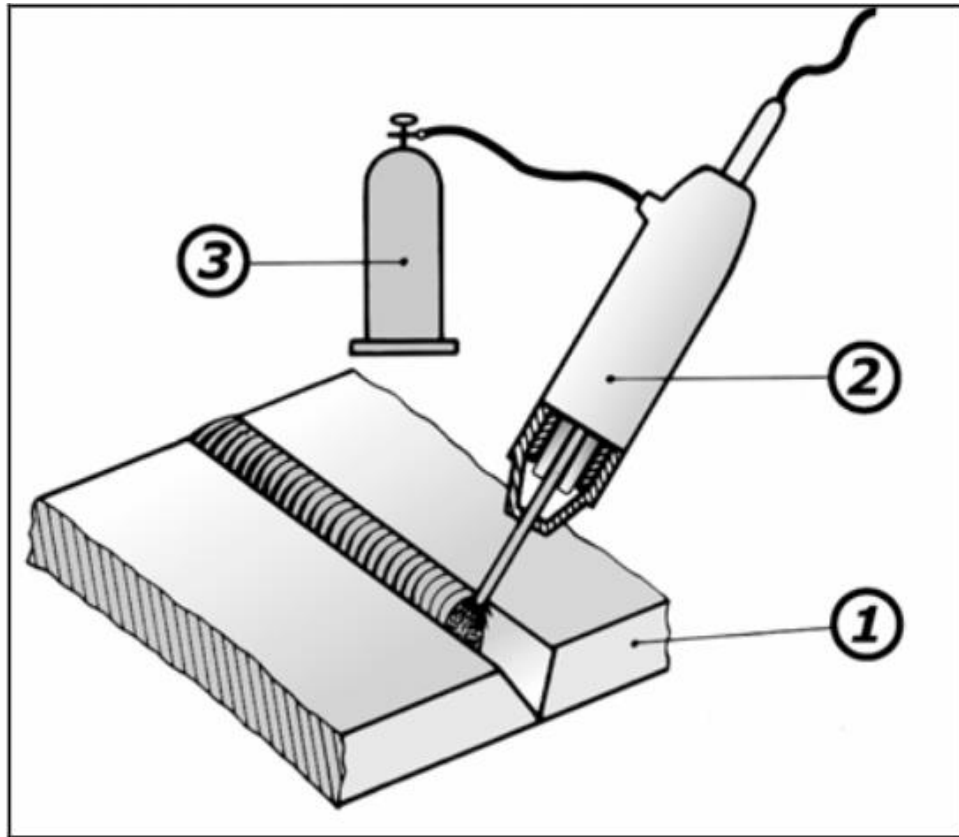


Figura 1: Soldadura en una atmósfera de gas protector [18].

En la Figura 1 podemos observar el metal base a soldar (1), el porta electrodo con el electrodo ubicado (2), y el abastecimiento de gas (3).

2.3 Evolución de la soldadura por arco eléctrico y la protección del baño fundido

Tras los primeros experimentos, Alexander Nikolayevich Lodygin intentó utilizar diversos gases para proteger el arco, obteniendo buenos resultados con el metanol. Sin embargo, la complejidad del equipamiento requerido hacía que esta opción fuera poco viable. Retomando y modificando la idea original de Alexander, en 1907 O. Kjellberg innovó al revestir los electrodos con material refractario aglomerado. Esta sustancia sólida, con un punto de fusión idéntico al metal de aporte, rodeaba el electrodo y protegía el baño de soldadura.

El desarrollo de dichos electrodos continuó, y en 1908 N. Bernardos creó un sistema de electro escoria a partir de los electrodos mejorados de Kjellberg. Los electrodos fusibles experimentaron una mejora crucial en 1914, gracias a O.

Kjellberg, en colaboración con A. P. Strohmenger. Estos nuevos electrodos estaban constituidos por una varilla de aleación metálica (el metal de aporte) y un recubrimiento especial a base de asbesto, adoptando una forma muy similar a la de los electrodos que se utilizan en la actualidad.

2.4 Principios del sistema de soldadura por arco eléctrico

El sistema de soldadura por arco eléctrico es uno de los procesos de fusión más extendidos para unir piezas metálicas. Este método se basa en la aplicación de un calor intenso que funde el metal en la zona de unión de dos piezas, provocando una aleación entre las partes fundidas. En la mayoría de los casos, este proceso se complementa con la adición de un aporte metálico fundido. Una vez que el material fundido se enfría y solidifica, se obtiene una unión mecánicamente resistente. Generalmente, la resistencia a la tensión y a la rotura del sector soldado es similar o incluso superior a la del metal base.

El intenso calor necesario para fundir los metales en este tipo de soldadura es generado por un arco eléctrico. Este arco se forma entre las piezas a soldar y el electrodo, el cual puede ser movido manual o mecánicamente a lo largo de la unión. En algunos casos, el electrodo permanece fijo y el movimiento se imprime a las piezas a soldar.

2.5 Avances en la soldadura con atmósferas gaseosas

Los esfuerzos por mejorar la protección del arco y el baño de soldadura continuaron. En 1930, los estadounidenses H. M. Hobart y P. K. Devers desarrollaron el sistema de soldadura con gas inerte. Basado en este principio, el doctor Irving Langmuir ideó la soldadura de hidrógeno. En esta técnica, el arco se produce entre dos electrodos no consumibles de tungsteno, inmersos en una atmósfera de hidrógeno que se sopla sobre el arco, ofreciendo una protección eficaz contra la contaminación atmosférica (ver Figura 2). Los componentes son: material a soldar (1), material de aporte (2), electrodos de tungsteno (3), provisión de hidrógeno a presión (4) y la fuente eléctrica (5).

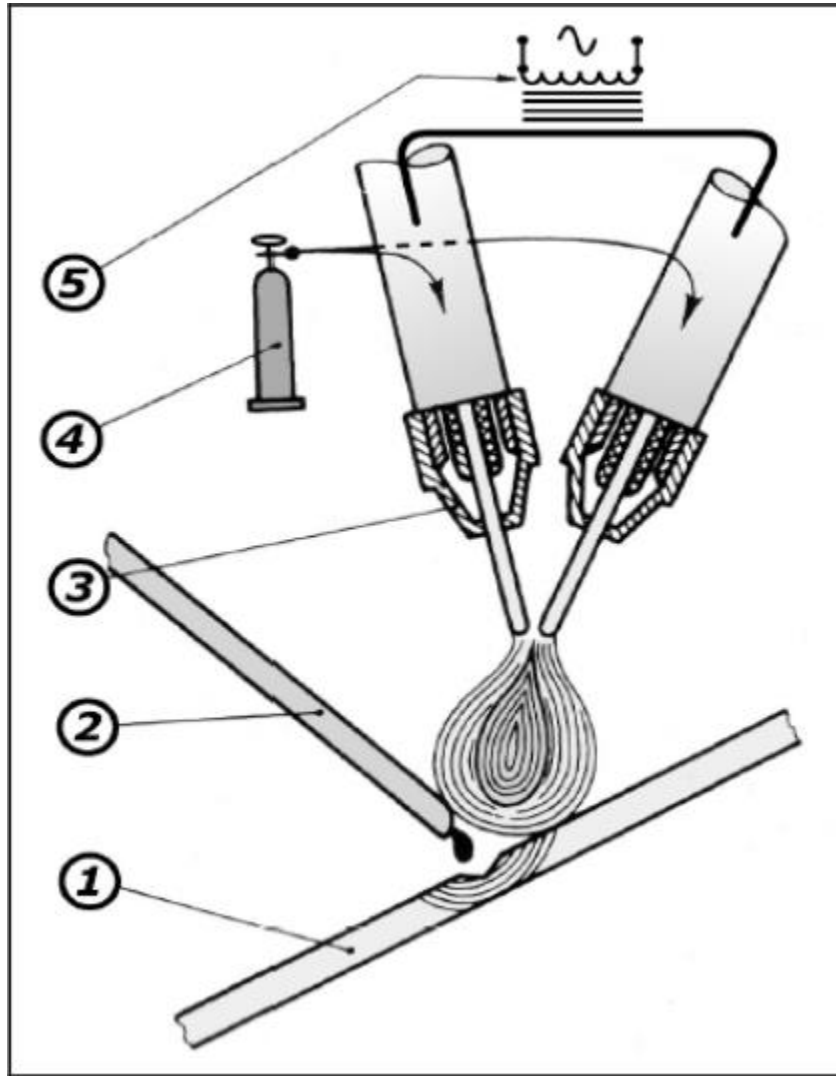


Figura 2. Arco entre dos electrodos [18].

Los esfuerzos por mejorar la protección del arco y el baño de soldadura continuaron. En 1930, los estadounidenses H. M. Hobart y P. K. Devers desarrollaron el sistema de soldadura con gas inerte. Basado en este principio, Irving Langmuir ideó la soldadura de hidrógeno. En esta técnica, el arco se produce entre dos electrodos no consumibles de tungsteno, inmersos en una atmósfera de hidrógeno que se sopla sobre el arco. Este proceso se beneficia de la descomposición térmica del hidrógeno molecular en hidrógeno atómico, que transfiere calor a las piezas al recombinarse una vez atravesado el arco. Este método es aún empleado para soldar chapas delgadas.

En 1942, el norteamericano R. Meredith, creador del soplete para TIG, desarrolló una variedad del sistema anterior. La soldadura TIG es considerada la "joya" de los procesos de soldadura, ya que produce cordones excepcionalmente limpios, libres de fundentes y perlillas, con mínima contaminación. Las uniones resultantes son fuertes, dúctiles y altamente resistentes a la corrosión, con requisitos de mantenimiento casi nulos. Por estas razones, TIG es el método preferido para aplicaciones críticas en industrias como la automotriz de alta competición, aeronáutica, construcción de cohetes y reactores nucleares.

Los avances continuaron y, en 1948, diversos ingenieros desarrollaron el sistema MIG, que incluye soldaduras por arco en atmósferas de helio o argón. Ambos gases son inertes y cumplen la función crucial de desplazar el oxígeno de la zona de soldadura, evitando la contaminación. Las ventajas del sistema MIG incluyen terminaciones considerablemente más limpias en comparación con la soldadura por arco manual, así como su versatilidad para realizar soldaduras de buena calidad en espesores delgados, sin necesidad de reemplazar varillas o electrodos de forma continua.

2.6 Diversificación de la soldadura y su impacto industrial

Los progresos en la industria electrónica permitieron desarrollar nuevas técnicas de unión. Esto incluye la soldadura por resistencia (con sus variantes a tope, continua y por puntos), la soldadura por inducción para materiales conductores del calor, y la soldadura dieléctrica para materiales no conductores. Finalmente, la soldadura aluminotérmica surgió como una combinación de un sistema de calentamiento con el procedimiento Slavianoff.

La gran variedad de aplicaciones industriales de los sistemas de soldadura ha alcanzado un grado tal que, en la mayoría de los casos, han sustituido los métodos tradicionales de forjado y remachado. Esta evolución ha permitido resolver problemas de estanqueidad, incrementar la rigidez de las estructuras y eliminar vibraciones, consolidando a la soldadura como un proceso indispensable en la manufactura moderna.

2.7 Tipos de soldadura

En las figuras 3-5 se muestran los principales procesos de soldadura en aluminio que se llevan a cabo por fusión, fusión y presión, resistencia y contacto y fase sólida con algunas de sus aplicaciones.

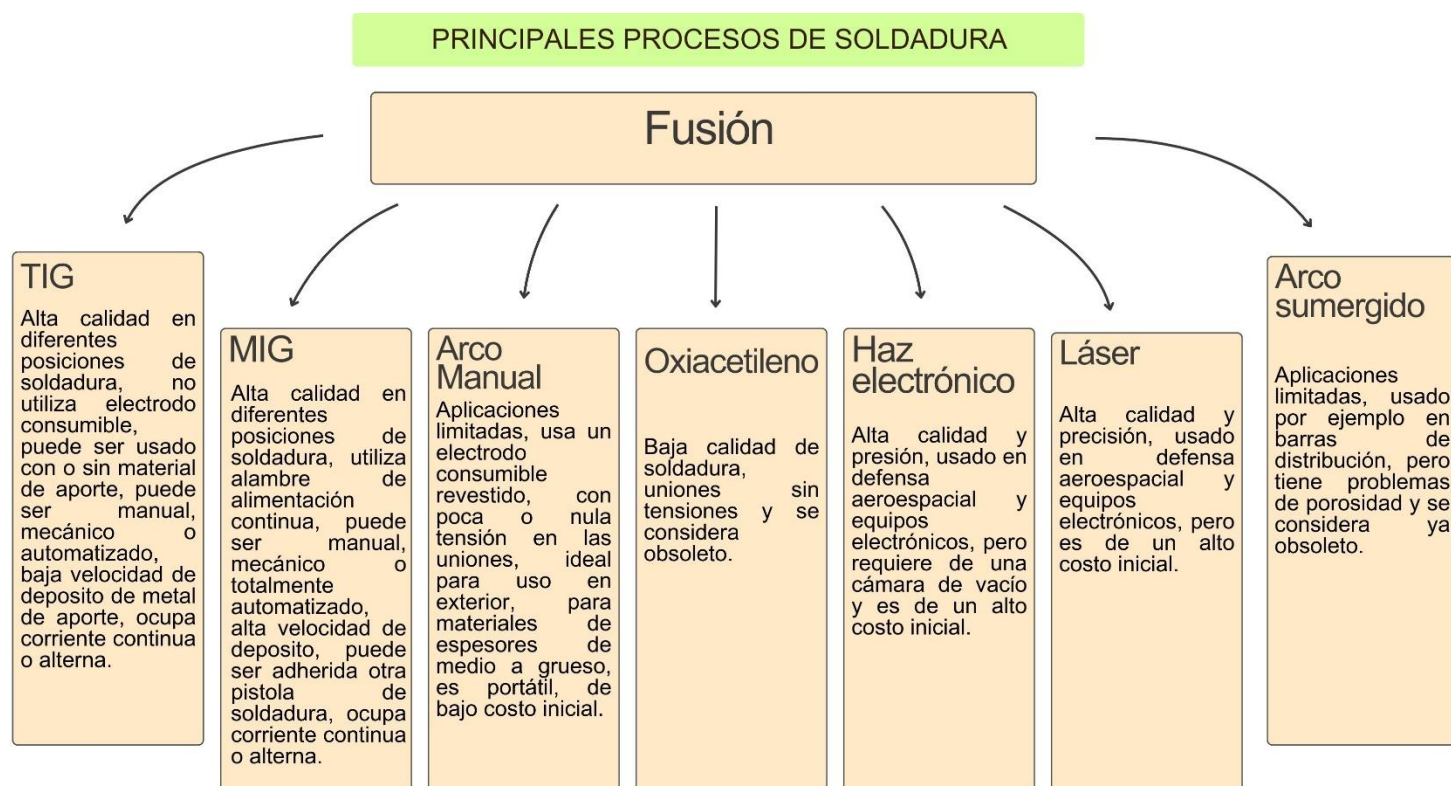


Figura 3: Procesos de soldadura por fusión [19].

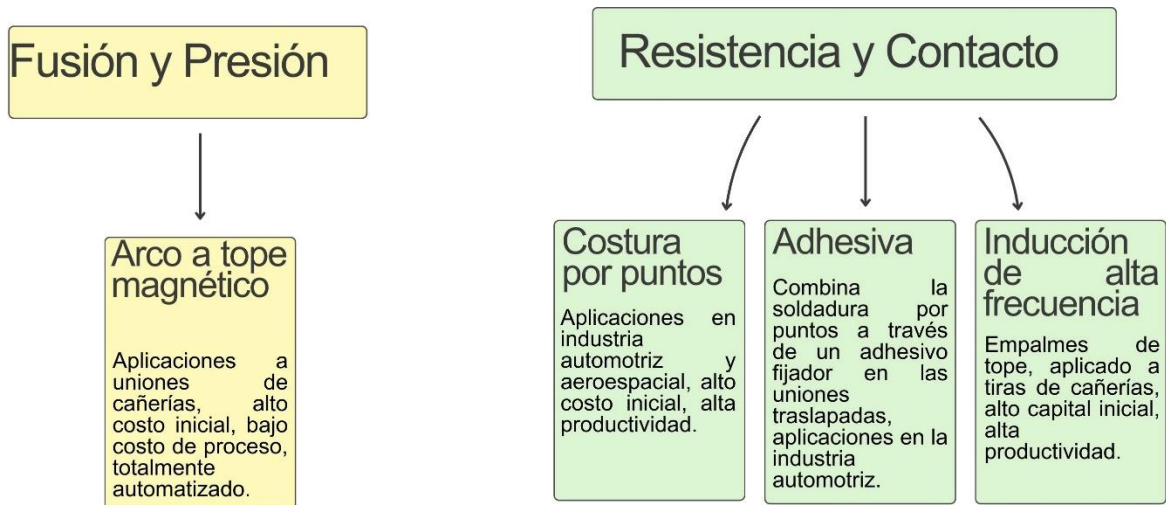


Figura 4: Procesos de soldadura por fusión y presión, resistencia y contacto [19].

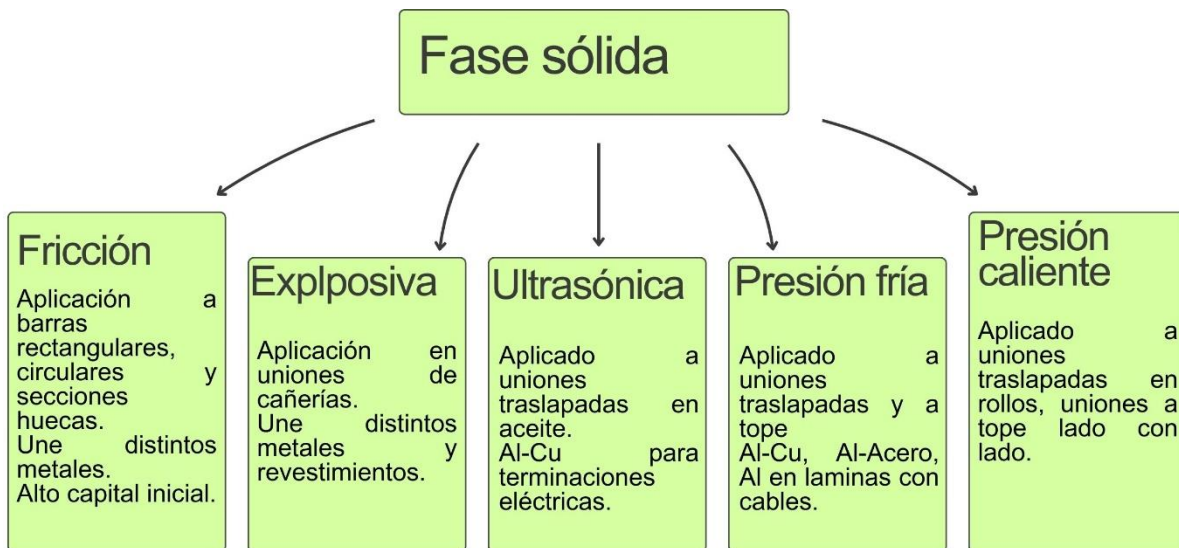


Figura 5: Procesos de soldadura por fase sólida [19].

2.8 Procesos de soldadura

La correcta y precisa preparación de las uniones es un paso fundamental para lograr una soldadura de aluminio eficaz y de alta calidad. Esta fase es crítica no solo para asegurar una buena penetración en la raíz de la unión, sino también para facilitar que el soldador produzca una soldadura con el mínimo de defectos y a un costo aceptable. Para ello, se utilizan diversas herramientas y procesos térmicos de fabricación, tanto para los cortes iniciales como para la preparación final de la junta. Se discutirán estos métodos, centrándose específicamente en los

tipos de soldadura TIG, MIG y SMAW, que son los de mayor relevancia para el presente estudio.

2.9 Soldadura por TIG

La soldadura TIG, es un proceso de soldadura al arco que destaca por su precisión y calidad. También se le denomina soldadura por heliarco debido al uso del gas Helio como protector en algunas aplicaciones.

Este proceso utiliza un electrodo no consumible de tungsteno y un gas inerte para proteger la zona de fusión. El arco de soldadura, generado entre el electrodo de tungsteno y el metal base, actúa únicamente como fuente de calor. El soldador tiene la flexibilidad de decidir si añade o no un alambre de aporte o relleno. La soldadura fundida resultante es fácil de controlar, y el arco es notablemente estable. Además, este proceso permite utilizar corrientes bajas, lo que lo hace ideal para soldar espesores delgados y producir un metal de soldadura de muy alta calidad. Sin embargo, para obtener los mejores resultados, se requiere de soldadores con gran experiencia y habilidad.

El proceso TIG es un método por fusión, donde el calor se genera al establecer un arco eléctrico entre el electrodo de tungsteno (no consumible) y el metal base o pieza a soldar. Dado que el electrodo no aporta metal ni se consume en este proceso, si se requiere aporte metálico, este se añadirá manualmente desde una varilla o alambre a la zona de soldadura, utilizando una técnica similar a la de la soldadura oxiacetilénica. La zona de soldadura está constantemente protegida por un gas inerte, cuyo objetivo primordial es desplazar el aire atmosférico. Esto elimina la posibilidad de contaminación por oxígeno y nitrógeno presentes en la atmósfera, y además, evita la formación de escoria o la necesidad de utilizar fundentes ("flux") protectores lo cual podemos ver en la Figura 60.

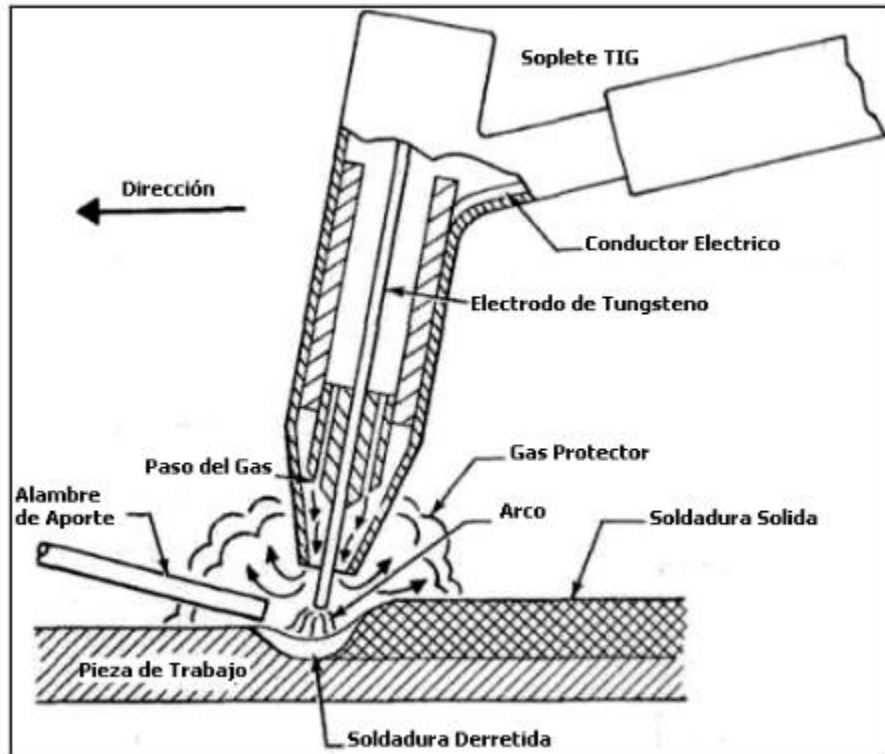


Figura 6: Esquema de un soplete para soldadura TIG [Haynes Techbook Welding Manual] [18]

2.10 Soldadura MIG

La soldadura MIG, es un proceso de soldadura por arco que utiliza un electrodo continuo en forma de alambre. Este alambre, junto con el metal de aporte, el arco eléctrico y el charco de soldadura, se protege constantemente mediante un gas inerte.

Este proceso ofrece varias ventajas significativas, incluyendo altas velocidades de soldadura y una zona afectada por el calor (ZAC) relativamente pequeña en comparación con la soldadura TIG. Además, asegura una excelente remoción de la película de óxido durante la soldadura y permite la soldadura en todas las posiciones.

La versatilidad de la soldadura MIG ha sido perfeccionada con el tiempo. Esto incluye el uso de gases activos de blindaje, como el CO_2 , para soldar ciertos metales ferrosos. Existen diversas configuraciones de electrodos: desde electrodos desnudos con protección gaseosa, hasta electrodos con fundentes

similares a los usados en procesos de arco protegido convencionales, y electrodos huecos con núcleo fundente. En algunos casos, es posible incluso combinar el uso de electrodos con fundente (recubierto o hueco) y protección gaseosa simultáneamente. Dada su versatilidad y eficiencia, la soldadura MIG es el proceso manual más ampliamente utilizado para la unión de aluminio.

El proceso MIG se emplea tanto con equipos semiautomáticos como automáticos, siendo ideal para la producción de soldadura a gran escala. Puede aplicarse a la mayoría de los metales y en todas las posiciones, ajustando las variaciones energéticas necesarias. Es un proceso económico que requiere poca o ninguna limpieza del depósito de soldadura, lo que optimiza los tiempos de producción. A diferencia de los sistemas de arco protegido y TIG, con MIG rara vez es necesario interrumpir el proceso de soldadura.

El sistema MIG posee cualidades importantes al soldar aceros, tales como:

- El arco siempre es visible para el operador.
- La pistola y los cables de soldadura son ligeros, facilitando su manipulación.
- Es uno de los sistemas de soldadura más versátiles disponibles actualmente.
- Ofrece una gran rapidez en el depósito de material.
- Presenta un alto rendimiento.
- Permite la automatización del proceso.

En el caso específico de la soldadura de aluminio, puede ser preferible acoplar la fuente de poder con una unidad alimentadora de alambre de velocidad constante. Esta combinación, aunque solo ofrece un pequeño grado de autorregulación automática y podría exigir mucho al mecanismo en soldadura semiautomática, es valorada por algunos usuarios. Consideran que permite un rango de control sobre la energía del arco crucial para manejar la alta conductividad térmica del aluminio.

En la soldadura MIG, las gotas de metal fundido se transfieren a través del arco desde un alambre-electrodo. Para un diámetro dado del electrodo y con una

protección gaseosa, la cantidad de corriente determina el tamaño de las gotas y la frecuencia con la que se desprenden del electrodo.

- Valores bajos de amperaje (Figura 7A): Las gotas crecen hasta alcanzar un diámetro varias veces mayor que el del electrodo antes de desprenderse. La velocidad de transferencia es de solo varias gotas por segundo.
- Valores intermedios de amperaje (Figura 7B): El tamaño de las gotas desprendidas disminuye rápidamente, llegando a ser igual o menor que el diámetro del electrodo, y la velocidad de separación aumenta a varios cientos por segundo.
- Valores altos de amperaje (Figura 7C): La velocidad de separación de las gotas se incrementa a medida que la corriente aumenta, resultando en gotas bastante pequeñas.

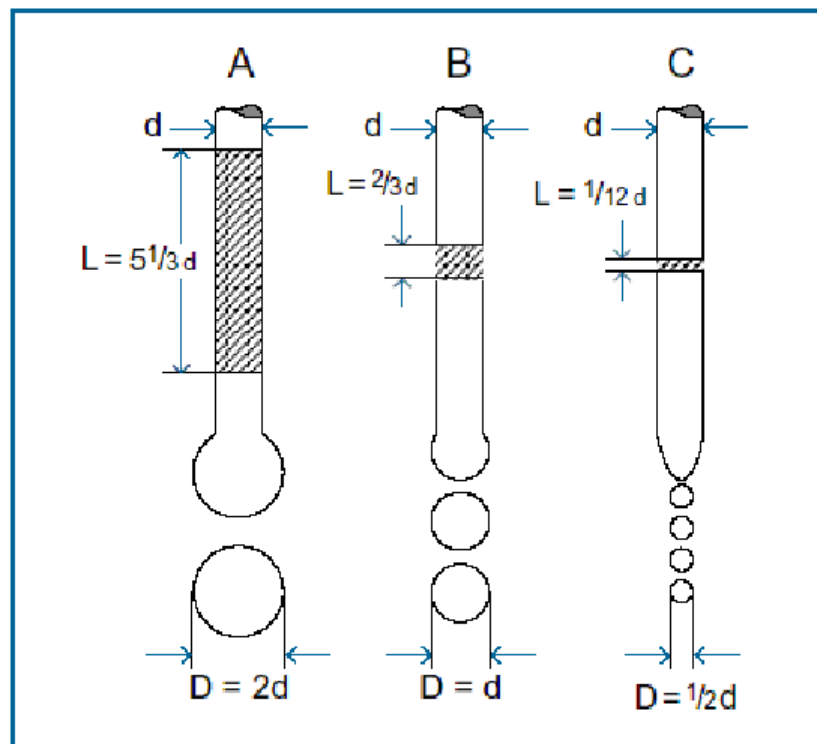


Figura 7: Variación del amperaje y su influencia en las gotas de soldadura [Open House] [18].

2.11 Principios de la soldadura SMAW

La soldadura por arco eléctrico es un proceso que aprovecha la potencia eléctrica de baja tensión. El calor necesario para calentar y fundir el metal se genera a partir de la descarga de un arco eléctrico que surge entre las piezas a unir, denominadas metales o piezas de trabajo, y el electrodo.

Bajo la acción de este intenso calor, los bordes del metal base y el extremo del electrodo se funden, creando el baño de soldadura. Este baño permanece en estado líquido por un breve período. Al solidificarse, forma el metal de la costura, estableciendo así la unión soldada. Lo que se observa en la Figura 9.

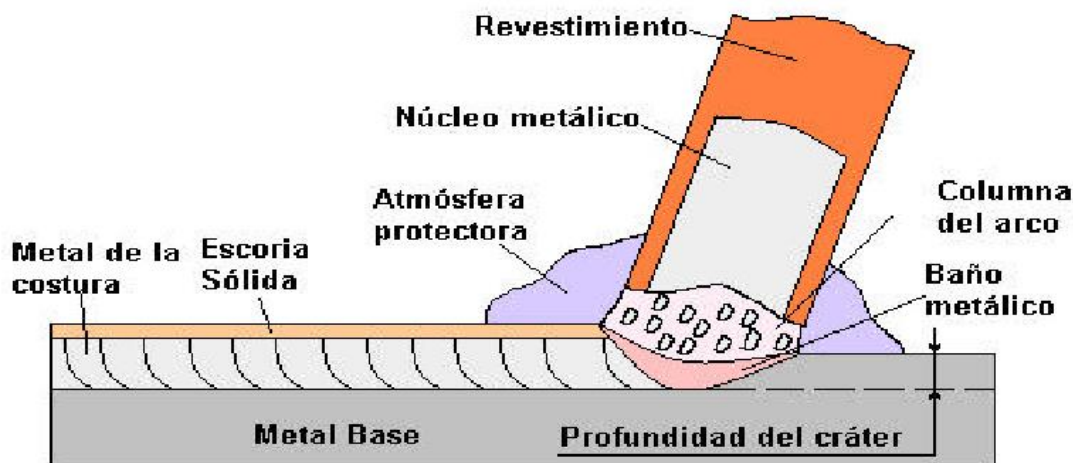


Figura 8: Esquema del arco eléctrico empleado en la soldadura por arco eléctrico [22].

El arco eléctrico es esencialmente una descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos: uno negativo (cátodo) y otro positivo (ánodo). Para que este fenómeno ocurra, es indispensable la presencia de un medio con partículas ionizantes, ya sea un gas o un líquido.

Dentro de la columna del arco, la corriente eléctrica se transmite a través de un proceso continuo de ionización. Este proceso inicia con la emisión de electrones desde el extremo incandescente del cátodo. Estos electrones son acelerados por la acción del campo eléctrico y, al colisionar con los átomos neutros del gas presente en la columna del arco, logran desalojar uno o varios electrones de la envoltura atómica debido a su elevada energía cinética. Los electrones liberados

se dirigen hacia el ánodo, mientras que los iones positivos (átomos neutros que han perdido electrones), se mueven hacia el cátodo. Al chocar con el cátodo, estos iones positivos desprenden más electrones y se convierten nuevamente en átomos neutros, perpetuando el ciclo.

Complementando este mecanismo principal, también se produce la fotoionización, impulsada por la energía de los rayos ultravioleta, y la ionización térmica, ambas contribuyendo a mantener el medio conductivo necesario para la descarga del arco como se observa en la Figura 10.

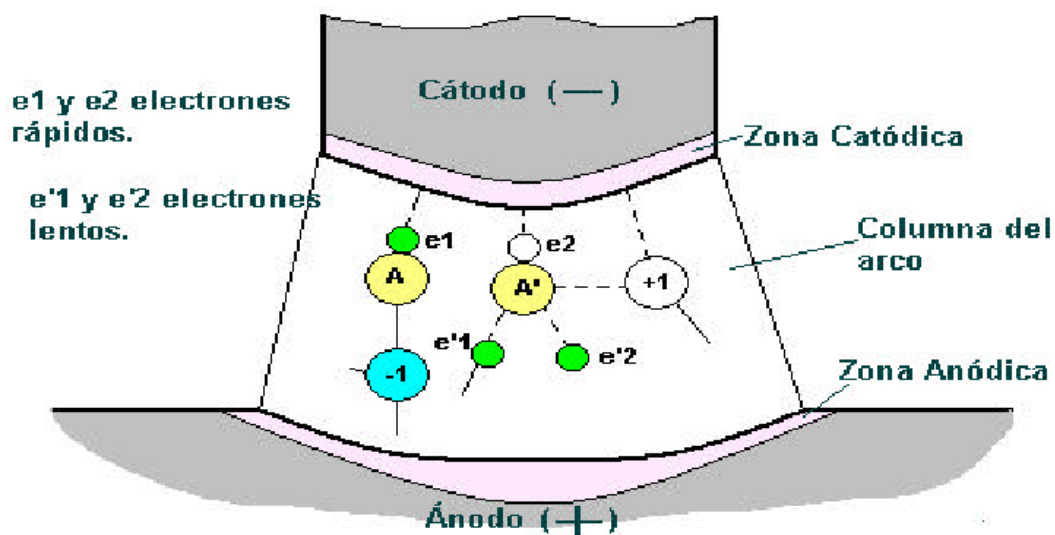


Figura 9: Forma en que ocurre la ionización del arco eléctrico [22].

2.12 Soldadura SMAW

El proceso de soldadura por arco eléctrico más utilizado a nivel global es la SMAW. La configuración para este proceso es relativamente sencilla (Ver Figura 11). Consiste en un electrodo metálico (3) que se conecta a uno de los bornes de la máquina de soldadura (1). Por otro lado, el metal base (2) se conecta al otro borne (5) de la máquina. El electrodo (3) es sujetado firmemente por el porta electrodo o tenaza.

Cuando se emplea corriente continua (CC), la polaridad es un factor clave:

- Si el electrodo está conectado al borne negativo, se denomina polaridad normal (CC-).
- Si el electrodo está conectado al borne positivo, se conoce como polaridad invertida (CC+).

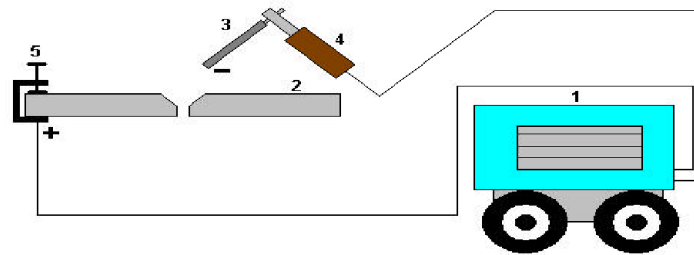


Figura 10: Instalación de soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido [22].

2.13 Tipos de máquinas de soldadura por arco eléctrico

Las máquinas de soldadura por arco eléctrico se clasifican según el tipo de corriente que producen.

2.13.1 Máquinas de corriente alterna (CA): Principalmente transformadores y osciladores. Los transformadores de CA son eficientes y de mantenimiento sencillo, ya que suelen ser fabricados en seco y monofásicos. Cuentan con un enrollado primario y uno secundario. La regulación de la corriente (amperaje) se logra ajustando el número de espiras en el secundario (regulación escalonada), desplazando un enrollado respecto al otro, o interrumpiendo las líneas de fuerza del enrollado inductor mediante un aislante. Su factor de potencia ($\cos \phi$) es generalmente menor que el de las máquinas de corriente continua [22].

2.13.2 Máquinas de corriente continua (CC): Incluyen generadores, convertidores, rectificadores e inversers.

- Los generadores integran un motor de combustión interna y un generador de corriente continua. Su principal ventaja es la independencia de la red

eléctrica, lo que los hace ideales para soldaduras en sitios remotos. Requieren un mecanismo de sincronización para mantener estables las revoluciones del generador, independientemente de las variaciones del motor.

- Los convertidores son similares a los generadores, pero sustituyen el motor de combustión interna por un motor eléctrico de corriente alterna. Tanto generadores como convertidores presentan una eficiencia baja debido a las pérdidas mecánicas asociadas al giro de sus componentes, y su mantenimiento es complejo.
- Los rectificadores están compuestos por un transformador trifásico y un bloque de diodos semiconductores que convierten la corriente alterna en continua. Son menos complejos de reparar que los generadores y convertidores, aunque su mantenimiento es más laborioso que el de los transformadores de CA, y requieren una unidad de enfriamiento para los diodos.
- Las máquinas de corriente continua ofrecen la ventaja de permitir la fusión de electrodos con revestimientos refractarios. La capacidad de seleccionar entre polaridad normal (CC-) o polaridad invertida (CC+) es crucial, ya que permite concentrar el calor del arco de forma indistinta en el extremo del electrodo o en la pieza a soldar [22].

2.14 Características y designación de los electrodos revestidos

Los electrodos revestidos son componentes esenciales en la soldadura, constituidos por un alma metálica (o alambre) y un revestimiento exterior. El alma suele ser una varilla de acero con aproximadamente 0.10% de carbono para aceros de baja aleación; para aceros inoxidables, incluye níquel y cromo, para mayor referencia podemos ver la Figura 12.

El revestimiento desempeña múltiples funciones críticas durante el proceso de soldadura:

- Estabilización del arco de soldadura: Ayuda a mantener el arco constante y controlado.
- Protección del baño de fusión: Crea una atmósfera protectora que previene la oxidación y nitruración del metal fundido por el aire circundante.
- Introducción de elementos aleantes: Aporta elementos deseables al baño para mejorar las propiedades del metal de soldadura.
- Formación de escoria: Genera una capa de escoria que protege el cordón de soldadura del enfriamiento rápido y de la contaminación atmosférica.

Según la composición química de sus revestimientos, los electrodos se clasifican en varios tipos:

- Celulósicos: Compuestos principalmente por celulosa ($C_6H_{10}O_5$), madera o algodón, además de silicatos naturales y ferroaleaciones reductoras. Ofrecen una gran penetración y pueden emplear cualquier tipo de corriente.
- Ácidos: Contienen fundamentalmente óxidos de hierro, silicatos y ferroaleaciones. Proporcionan protección a través de una espesa capa de escoria. Son económicos y permiten el uso de cualquier tipo de corriente, aunque no garantizan elevadas propiedades mecánicas en la unión.
- Rutílicos: Constituidos por rutilo (95% TiO_2) o ilmenita (50% TiO_2 y 50% FeO), silicatos y ferroaleaciones. Brindan un arco muy estable con cualquier tipo de corriente. Producen propiedades mecánicas superiores a los ácidos y son poco sensibles a la humedad.
- Básicos: Compuestos por carbonato de calcio o magnesio, silicatos, ferroaleaciones, feldespato y espatoflúor. Solo se sueldan con corriente continua y polaridad invertida (CC+). Son los electrodos que permiten obtener las mejores propiedades mecánicas en las uniones. Sin embargo, son muy sensibles a la humedad, por lo que requieren un secado previo a temperaturas de 120-150°C antes de su uso.

Identificación de electrodos										
Los electrodos están sujetos a normas de calidad, resultados y tipos de uso. La nomenclatura es la siguiente:										
E - 7018				B - 3						
Letra "E"	Dos o tres primeros dígitos	Penultimo dígito	Numeración	Dos últimos dígitos					Letra	Número
				Corriente	Polaridad	Revestimiento	Arco	Penetración	Grupo de aleación	Aleante principal
Electrodo para soldar con arco metálico protegido (eléctrica SMAW)	Resistencia mínima a la tensión del cordón depositado en miles de libras por pulgada cuadrada	Posición ideal de soldadura 1= Todas las posiciones 2 = Plana y filete horizontal 3 = Plana	xx10	CD	PI	Celulosa-Sodio	Energico	Alta	A-1	Molibdeno
			xx11	CA-CD	PI	Celulosa-Potasio	Energico	Alta		
			xx12	CA-CD	PD	Rutilo-Sodio	Medio	Mediana		
			xx13	CA-CD	PD-PI	Rutilo-Potasio	Suave	Ligera	B-1	Cromo-Molibdeno
			xx14	CA-CD	PD-PI	Rutilo-Polvo Fe	Suave	Ligera	B-2	
			xx15	CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-1	Niquel
			xx16	CA-CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-2	
			xx18	CA-CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-3	
			xx20	CA-CD	PD-PI	Oxido de Hierro	Medio	Mediana	D-1	Molibdeno-
			xx24	CA-CD	PD-PI	Rutilo	Medio	Mediana	D-2	Manganeso
			xx27	CA-CD	PD	Polvo de hierro	Medio	Mediana	M-	Militar
			xx28	CA-CD	PI	Bajo Hidrogeno	Suave	Ligera	S-	No clasificado

Figura 11 Identificación de electrodos, biblioteca chile, ENDESA, curso: inspección de soldaduras [23].

2.15 Caligrafía de soldadura y sus beneficios

La caligrafía en soldadura describe la maestría del soldador para ejecutar un cordón con una apariencia uniforme, consistente y estéticamente impecable. Más allá de la resistencia mecánica, la buena caligrafía de un cordón es un indicador directo del control preciso del arco, la velocidad de avance y el aporte de material.

Para lograr esta precisión, el soldador debe dominar diversos elementos clave; mantener una velocidad de avance constante es crucial para que el cordón sea uniforme, ya que una velocidad demasiado lenta puede llevar a un cordón excesivamente ancho o con una sobre monta indeseada, mientras que una velocidad muy rápida podría resultar en un cordón estrecho, con poca penetración o incluso interrupciones. De igual forma, es vital que la longitud del arco se mantenga consistente, pues un arco excesivamente largo puede causar inestabilidad, salpicaduras y porosidad, mientras que uno muy corto podría provocar que el electrodo se adhiera y genere un cordón irregular.

El ángulo del electrodo o la antorcha con respecto a la pieza de trabajo influye directamente en la penetración, la forma del cordón y la distribución del calor; un ángulo incorrecto puede afectar negativamente el flujo del metal fundido y la protección gaseosa.

Un aspecto crítico en la caligrafía es la gestión del calor aportado, el cual es directamente proporcional a la potencia de soldadura e inversamente proporcional al tiempo que el calor permanece en una zona determinada (velocidad de avance). Esto se puede expresar como:

$$(Q) \text{Calor aportado} = \frac{\text{Potencia (fija)}}{\text{Velocidad (avance del soldador)}}$$

Cuanto mayor sea el tiempo que el soldador permanece en una zona, más calor se acumula en ella. Por lo tanto, debe existir una relación equilibrada entre la potencia de soldadura y la velocidad de avance. Una potencia adecuada combinada con una velocidad de avance excesivamente alta puede resultar en una fusión incompleta del metal, ya que no se le da tiempo suficiente para fundirse correctamente. Por el contrario, una potencia baja para un espesor determinado podría compensarse con una velocidad de avance más lenta. Esta interdependencia de variables hace que la elaboración de tablas de parámetros de soldadura sea compleja, dado que el "estilo" o la técnica particular de cada soldador influye significativamente.

Dentro de esa técnica desarrollada por el soldador, la caligrafía determina la trayectoria que realiza el electrodo a lo largo del cordón de soldadura, siendo fundamental porque define las zonas donde se depositará mayor temperatura y por ende más soldadura. Esto dependerá principalmente del tipo de unión a soldar y del espesor del material. Es crucial que la amplitud final de esta trayectoria se relacione con el diámetro del electrodo utilizado. Por ejemplo, en la soldadura SMAW, para una oscilación semicircular, se sugiere que la amplitud no supere el doble del diámetro del electrodo. Así, con un electrodo de 2.5 mm de diámetro y tomando una línea central imaginaria en la unión, el desplazamiento lateral debería ser de un diámetro de electrodo hacia cada lado. Si este movimiento fuera

más amplio, existe el riesgo de que el electrodo se enfríe, provocando una fusión incompleta en el cordón. Además, en aquellas zonas donde el electrodo pase dos veces, se acumulará una mayor temperatura [20].

Las caligrafías más frecuentes son las siguientes:

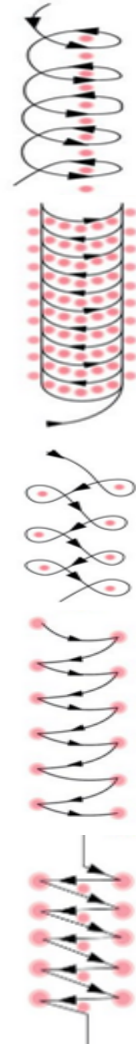
1. Oscilación Circular (“Rulito”) Mantiene calor localizado en el centro, buena penetración, ideal para ángulos interiores. El punto rosa simboliza que el electrodo pasa dos veces por esa zona y acumula temperatura localizada.

2. Oscilación semi-circular (“Media luna”) Garantiza una fusión total de las juntas, asegura la fusión de los bordes, ideal para juntas chanfladas y recargue de piezas.

3. Oscilación semi-circular transversal (“Media luna”) Utilizado para terminación, el calor se concentra en los bordes, es importante un movimiento uniforme.

4. Oscilación Zig-Zag Concentra el calor en los laterales cuando se suelda en posición vertical ascendente, sobre la cabeza y juntas muy finas, se utiliza este movimiento para evitar acumulación de calor e impedir así que el material aportado gotee.

5. Oscilación Zig-Zag (transversal) Para efectuar cordones anchos, genera un buen acabado en sus bordes facilitando que suba la escoria a la superficie, permite el escape de los gases con mayor facilidad y evita la porosidad en el material depositado, se utiliza en toda posición.



2.16 Variables que afectan la calidad de la soldadura

La consecución de una soldadura de alta calidad es el resultado de la interacción compleja y precisa de múltiples variables, cuya comprensión y control son fundamentales en la ingeniería de materiales. Estas variables pueden categorizarse para un análisis sistemático.

- Parámetros eléctricos y de proceso:
 - Los ajustes directos en el equipo de soldadura ejercen una influencia determinante en la energía y estabilidad del arco.
 - La corriente (amperaje) es el factor más significativo en la penetración de la soldadura: un amperaje elevado incrementa la penetración y la tasa de fusión del electrodo, si bien un exceso puede derivar en quemaduras o deformaciones. Por el contrario, un amperaje insuficiente resultará en una penetración superficial y una unión deficiente.
 - El voltaje, por su parte, controla la longitud del arco, lo que a su vez define la forma del cordón y la fluidez del baño de fusión; un voltaje alto produce un cordón más ancho y plano, pero con riesgo de socavaciones y porosidad, mientras que uno bajo acorta el arco, generando un cordón estrecho y con escasa fusión.
 - La velocidad de avance (o de soldeo), es decir, la velocidad con la que el soldador desplaza el electrodo o la antorcha afecta directamente el aporte de calor a la pieza. Una velocidad excesiva puede causar falta de fusión, penetración incompleta o un cordón estrecho, mientras que una velocidad muy lenta puede provocar un calor excesivo que derive en deformación, quemaduras o un cordón excesivamente ancho y con sobre monta.
 - Finalmente, en la soldadura con corriente continua (CC), la polaridad (directa CC- o invertida CC+) es un factor crucial que define la concentración del calor del arco, impactando directamente la penetración y la tasa de fusión del electrodo.
- Materiales y consumibles:
 - La composición y el estado de los materiales que intervienen en el proceso son esenciales para la integridad de la unión.
 - Las propiedades físicas y químicas del metal base (como su punto de fusión, conductividad térmica o composición) dictan su respuesta al calor y la solidificación de la unión; por ejemplo, metales con alta

conductividad térmica, como el aluminio, demandan un mayor aporte de calor.

- La selección adecuada del material de aporte (electrodo o alambre), incluyendo su diámetro y composición química, debe ser compatible con el metal base para asegurar propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión óptimas en la unión, pues una elección incorrecta puede conducir a fisuras o porosidad.

En procesos como MIG y TIG, el tipo y el caudal de los gases de protección (Argón, Helio, CO₂ o sus mezclas), son vitales. Una protección gaseosa insuficiente o inadecuada expone el baño de fusión a la contaminación atmosférica (oxígeno y nitrógeno), lo que resulta en porosidad, fragilidad y otros defectos. Por el contrario, un caudal excesivo puede generar turbulencias que arrastren contaminantes al baño de soldadura.

- Habilidades y técnica del operador:
 - La destreza del soldador es un factor determinante en la calidad final. La técnica de soldadura y caligrafía engloba la constancia en la longitud del arco, el ángulo del electrodo o la antorcha, la oscilación y el control del baño de fusión.
 - Una ejecución precisa de estas técnicas se traduce en un cordón uniforme y sin defectos visibles.
 - La experiencia y habilidad del soldador son fundamentales, ya que permiten ajustar y compensar variables en tiempo real, interpretar el comportamiento del baño de fusión y mantener la consistencia del proceso a lo largo de la unión.
- Preparación de la junta y la superficie:
 - La condición de los materiales antes de iniciar la soldadura es tan crítica como el proceso mismo.
 - Un diseño de junta adecuado (por ejemplo, tipo de bisel, ángulo de ranura, figura 8) y un ajuste preciso de las piezas, gap, es el espacio entre las piezas a soldar.

- Un gap adecuado permite que el metal de soldadura llene completamente la unión y se fusione correctamente con los metales base. Son indispensables para lograr una penetración completa y una distribución uniforme del metal de soldadura.
- Asimismo, la limpieza de la superficie es imperativa: la presencia de óxidos, grasas, aceites, humedad, pintura o cualquier otro contaminante puede generar defectos graves como porosidad, inclusiones de escoria y falta de fusión, comprometiendo la integridad de la unión.

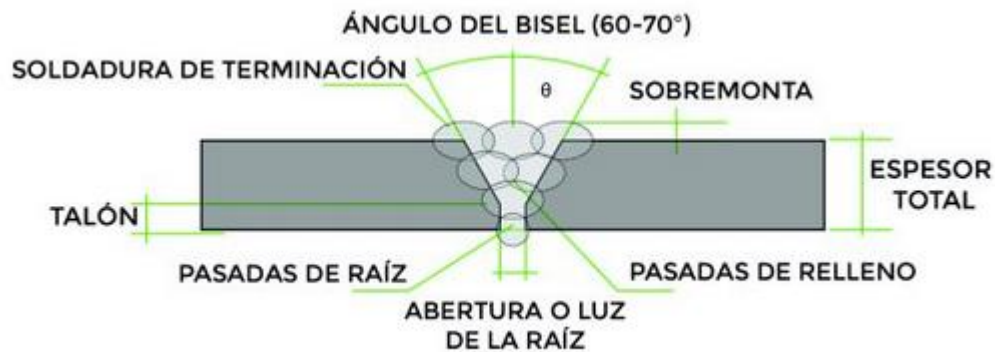


Figura 12: Partes que conforman un bisel [21].

- Condiciones ambientales y otros factores:
 - El entorno de trabajo también puede influir significativamente en la calidad de la soldadura.
 - Las condiciones ambientales, como temperaturas extremas o alta humedad, pueden afectar la velocidad de enfriamiento de la soldadura, la estabilidad del arco o la efectividad del gas de protección.
 - De manera similar, las corrientes de aire pueden disipar el gas de protección, dejando el baño de fusión expuesto a la contaminación atmosférica. Para ciertos materiales o espesores, la aplicación de precalentamiento (antes de soldar) y post calentamiento (después de soldar), es esencial para controlar la velocidad de enfriamiento,

reducir tensiones residuales y prevenir fisuras, particularmente en la ZAC.

- Por último, la condición y el mantenimiento del equipo son cruciales; fallas en la máquina, como una salida de corriente inestable o un alimentador de alambre defectuoso, pueden introducir inconsistencias en el proceso y comprometer la calidad del cordón.

2.17 Normativas

En el ámbito académico, las prácticas de laboratorio permiten a los estudiantes aplicar conocimientos teóricos en un entorno controlado. Por tanto, se considera necesario diseñar una propuesta que integre criterios técnicos, pedagógicos y de seguridad, adaptados a los recursos disponibles en instituciones educativas [9].

Es fundamental recordar que toda actividad de soldadura implica riesgos como exposición a radiación UV, inhalación de humos metálicos, quemaduras y riesgo eléctrico. Para mitigar estos riesgos y garantizar entornos de trabajo seguros, diversas normativas y códigos rigen las actividades de soldadura a nivel internacional y nacional.

A nivel internacional, la American Welding Society (AWS) establece la norma AWS Z49.1, "Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes", la cual es una referencia clave para lineamientos de seguridad en soldadura [10]. Asimismo, códigos como el ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Sección IX, son cruciales para la calificación de soldadores y procedimientos, especialmente en aplicaciones de alta presión. Las normas ISO también juegan un papel importante, como la ISO 3834, que establece requisitos de calidad para la soldadura por fusión, y las normas EN ISO 9606 y EN 287-1 para la cualificación de soldadores. En cuanto a los consumibles, existen normas específicas como la AWS A5.10/A5.10M (ISO 18273) para electrodos, alambres y varillas de soldadura de aluminio y sus aleaciones.

En el contexto mexicano, la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) emite Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que regulan la seguridad y salud en el

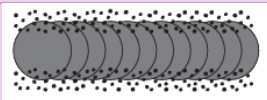
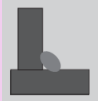
trabajo. Específicamente, la NOM-027-STPS-2008, "Actividades de soldadura y corte, condiciones de seguridad e higiene", establece las condiciones de seguridad e higiene que deben observarse para prevenir riesgos durante estas actividades. Esta NOM define obligaciones para patrones y trabajadores, incluyendo el análisis de riesgos, la capacitación, el uso de Equipo de Protección Personal (EPP) adecuado (cascos, guantes, ropa ignífuga, protección ocular y auditiva), y la necesidad de ventilación adecuada para el control de humos [NOM-027-STPS-2008]. Otras normativas relevantes incluyen la NOM-002-STPS-2010 sobre prevención y protección contra incendios, y la NOM-017-STPS-2008 sobre la selección, uso y manejo del equipo de protección personal.

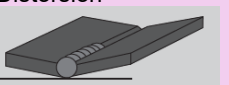
La adherencia a estas normativas es indispensable para asegurar la integridad física del personal y la calidad de las uniones, promoviendo una cultura preventiva tanto en la práctica profesional como en la formación académica. La inclusión de procedimientos de seguridad en toda práctica experimental es crucial para proteger a los estudiantes y formar futuros profesionales conscientes de los estándares industriales.

2.18 Errores comunes al soldar y cómo identificar la calidad de la soldadura

La forma del cordón puede indicar algunos errores de ejecución:

Tabla 2: Principales problemas de soldadura, causas y soluciones [19].

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCIÓN
Salpicaduras excesivas	Amperaje demasiado elevado para el electrodo	Reducir el amperaje o seleccionar un electrodo más grande
	Longitud del arco demasiado larga o voltaje demasiado alto	Reducir la longitud o el voltaje del arco
Fusión incompleta/ Falta de penetración	Aporte de calor insuficiente	Aumentar el amperaje. Seleccionar un electrodo más grande y aumentar el amperaje
	Técnica de soldadura no adecuada	Intentar mantener el cordón de soldadura bien centrado entre las dos piezas exactamente encima de donde se debe crear el bisel de la base de esta.
	Pieza sucia	Eliminar la grasa, aceite, humedad, óxido, pintura o revestimientos de la superficie de trabajo.

	Preparación equivocada de la junta	Material demasiado espeso. La preparación y el diseño de las juntas deben permitir el acceso al fondo de la ranura.
	Potencia térmica insuficiente	Aumentar el amperaje. Seleccionar un electrodo más grande y aumentar el amperaje. Reducir la velocidad de marcha.
Penetración excesiva/ agujeros	Aporte de calor excesivo	Seleccionar amperaje inferior y/o utilizar un electrodo más pequeño. Aumentar o mantener una velocidad de soldadura adecuada y constante
 Distorsión 	Aporte de calor excesivo	Utilizar el borse para mantener en posición el material de base. Efectuar soldaduras por puntos a lo largo de la junta antes de comenzar la operación de soldadura. Seleccionar un amperaje adecuado para el espesor y el electrodo. Aumentar la velocidad. Soldar en pequeños segmentos y permitir el enfriamiento entre las soldaduras.

SOLDADORA

- Utiliza los cables de soldadura más cortos posible. Si la fuente de alimentación está lejos, es mejor alargar los cables de alimentación que los de soldadura (llega máximo hasta 3 metros).
- Desenrolla las prolongaciones si están en un rollo y recuerda aumentar la sección de la prolongación cada 15 metros aproximadamente para no tener sobrecalentamientos de esta ni bajadas de tensión.
- Asegúrate siempre de que los cables de soldadura están bien fijados, para no perder tensión ni cebar sobrecalentamientos o llamas entre los conectores que provocaría un rápido deterioro y pérdida de eficiencia [24].

ELECTRODOS

- Comienza por los electrodos más fáciles (Rutilos E6013); controla siempre las indicaciones del fabricante incluidas en la caja.
- Conserva los electrodos siempre en cajas cerradas y si es posible en condiciones de baja humedad.
- Si el electrodo permanece pegado, mueve ligeramente el electrodo a la derecha y a la izquierda: de esta manera se separará fácilmente de la pieza y podrás volver a comenzar a soldar.

- Controla la polaridad de los electrodos antes de soldar. Normalmente los electrodos rutilos se conectan al polo negativo y los básicos al positivo. La caja del electrodo debe incluir esta indicación.

CONSEJOS DE USO

- Antes de soldar, prepara las piezas limpiándolas bien (no debe quedar pinturas ni óxido).
- Controlar siempre que se utilizan EPI en buenas condiciones (máscara y guantes). Es mejor utilizar una máscara de casco para una mayor protección ante el humo y la irradiación.
- Mientras se solda, mantén el electrodo casi en contacto con el metal: esto te permitirá ser más preciso y hacer que la soldadura se deslice de la mejor manera.
- Si se solda en vertical, solda desde arriba hacia abajo para efectuar los trabajos con más facilidad.
- Efectuar un movimiento en zigzag (electrodo up & down) para efectuar una junta más espesa (cordón más largo).
- Si se soldan espesores especialmente gruesos, puedes efectuar dos o más pasadas de soldadura. Al final de la primera, recuerda quitar las escorias antes de efectuar la segunda.
- Evitar utilizar estructuras metálicas que no formen parte de la pieza en elaboración, en sustitución del cable de retorno de la corriente de soldadura; esto puede resultar peligroso para la seguridad y dar resultados insuficientes en la limpieza [24].

Capítulo 3 “Resultados”

3.1 Propuesta de procedimiento experimental

Propuesta de Laboratorio: Soldadura de Aluminio 6061-T6 con SMAW.

Esta propuesta de práctica de laboratorio se centra en la soldadura de aluminio 6061-T6 utilizando el proceso SMAW. La aleación de aluminio 6061-T6 es conocida por su equilibrio entre resistencia, maquinabilidad y resistencia a la corrosión, el tratamiento T6 indica que ha sido sometido a un tratamiento térmico de solución y envejecimiento artificial para mejorar sus propiedades mecánicas. Es crucial destacar que, si bien SMAW es un proceso versátil, no es el método más recomendado para la soldadura de aluminio debido a las características inherentes de este metal, como su rápida oxidación, baja temperatura de fusión y alta conductividad térmica, que dificultan el control del arco y la eliminación de la capa de óxido con electrodos revestidos convencionales. Sin embargo, esta práctica permitirá comprender los desafíos y las limitaciones de aplicar este proceso a dicho material. Para esta práctica se aconseja usar electrodos de la serie 4043 ó 1100 que son específicos para romper la capa de óxido. El electrodo 1100 es más utilizado para aluminios puros y el 4043 sirve para más aleaciones por lo que usaremos este electrodo.

1. Materiales y equipo:

- Metal Base: Planchas o perfiles de Aluminio 6061-T6. Dimensiones sugeridas: Placas de 3 mm a 6 mm de espesor, de aproximadamente 100x150 mm.
- Electrodos revestidos para soldadura de aluminio de la serie 4043 de diámetro 3/32' ya que el material a soldar es de 6 mm o menos. A menudo, el revestimiento es higroscópico, lo que significa que absorbe humedad y requiere almacenamiento en hornos o desecadores y un secado previo riguroso (temperaturas de 120-150°C, aunque para aluminio pueden variar, es crucial seguir las indicaciones del fabricante).

- Planta para soldar. Para electrodos de aluminio de 2.5 mm (3/32 in): Los rangos de amperaje podrían oscilar aproximadamente entre 50 y 80 amper.

2. Equipo de Protección Personal (EPP)

La seguridad es primordial en cualquier operación de soldadura.

Casco de Soldadura: Con filtro de sombra adecuado (en nuestro caso DIN 9 ó 10 para SMAW).

- Guantes de soldadura: De cuero, resistentes al calor y a las chispas.
- Ropa de trabajo: Bata de laboratorio de algodón o en su defecto chamarra de mezclilla gruesa y pantalones del mismo material o ignífugos, sin puños ni bolsillos abiertos que puedan atrapar chispas.
- Calzado de seguridad: Botas con punta de acero y suela antideslizante.
- Protección respiratoria: Mascarilla o respirador con filtro para humos metálicos, especialmente en espacios cerrados o con ventilación limitada. Los humos de soldadura de aluminio pueden ser irritantes.
- Protección ocular adicional: Gafas de seguridad debajo del casco para protección contra impactos y UV/IR cuando el casco no está bajado.

5. Metodología de la Práctica

1. Proceso de Limpieza del Metal:

- Utilizar un cepillo de acero inoxidable (exclusivo para aluminio para evitar contaminación con hierro), para eliminar la capa de óxido superficial y cualquier suciedad o grasa. El cepillado debe ser en una sola dirección.
- Desengrasar las superficies con un solvente adecuado (acetona o alcohol isopropílico) para eliminar aceites, grasas o cualquier residuo orgánico. Usar paños limpios y que no dejen pelusa. Permitir que el solvente se evapore completamente antes de soldar.
- Preparación de la unión: Realizar biseles en las piezas (por ejemplo, bisel en V a 60-70°), para asegurar una penetración adecuada, especialmente en

espesores mayores a 6 mm. Asegurar un ajuste preciso de las piezas (fit-up) para minimizar gaps y desalineaciones. Se puede soldar una unión solapada (o de traslape) sin necesidad de biselar, pero en una unión a tope (donde las piezas se unen borde con borde), el biselado es a menudo necesario, queda a consideración del docente encargado de la práctica.

2. Configuración del equipo: Conectar la planta para soldar en CC+ (polaridad invertida). Ajustar el amperaje inicial según el diámetro del electrodo y el espesor del material con la recomendación de 50 a 80 amps y el diámetro de 3/32' de la serie 4043.

Se recomienda un precalentamiento para espesores mayores a 3 mm o para reducir el riesgo de fisuración, se puede aplicar un precalentamiento suave a la pieza (aproximadamente 100-150°C). Esto ayuda a reducir el gradiente térmico y facilita la fusión. Se utilizará la técnica de soldadura de arrastre (empujando el electrodo en la dirección de avance), con una ligera oscilación para asegurar la fusión de los bordes, el operador debe observar cuidadosamente el baño de fusión, que en el aluminio es brillante y carece de la escoria protectora visible de los aceros, lo que dificulta la visión, aunado a esto se debe asegurar una excelente ventilación en el área de trabajo para disipar los humos generados por el fundente del electrodo.

3. Soldadura de prueba:

- Realizar cordones de prueba en chatarra de aluminio para ajustar los parámetros y familiarizarse con la técnica. Prestar atención al sonido del arco, la fluidez del baño y la formación del cordón.
- Ejecución de la soldadura: Realizar uniones a tope o en filete según el diseño de la práctica.
- Mantener un arco corto, una velocidad de avance constante y una oscilación adecuada.
- Observar la formación del cordón y la interacción del fundente.

4. Limpieza post-soldadura: Eliminar cuidadosamente la escoria residual con un cepillo de acero inoxidable o herramientas adecuadas. Esta escoria puede ser corrosiva.
5. Inspección visual: Evaluar la calidad del cordón en términos de apariencia, uniformidad, penetración aparente, presencia de porosidad, socavaciones o sobremonta.

La viabilidad de esta propuesta se ve respaldada por una serie de trabajos académicos que abordan temas similares a nuestro interés. Investigaciones de la Pontificia Universidad Católica del Perú [4], la Universidad Técnica de Ambato [19], la Universidad Austral de Chile [18] y la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos [22], han demostrado consistentemente que la soldadura de aluminio es un proceso totalmente viable. Estos estudios, que se enfocan en la soldabilidad de aleaciones como el AA6063 y el 6005-T6 con procesos como SMAW y MIG, confirman que, con las adecuaciones a los materiales con los que se cuenta en el laboratorio de materiales y el conocimiento técnico necesarios, los desafíos inherentes a la soldadura de este material pueden superarse de manera eficiente.

3.2 Recomendaciones

Considerando lo anterior, se plantean las siguientes recomendaciones:

1. La práctica debe ser implementada con un énfasis primordial en la adquisición de los principios básicos de la soldadura de aluminio, incluyendo la preparación de la unión, el control del arco, la gestión del calor y la comprensión de los defectos comunes. El objetivo principal será que los estudiantes comprendan el "cómo" y el "por qué" de los procesos, más allá de la perfección del cordón inicial.
2. Incorporar la práctica dentro de las asignaturas relevantes de Ingeniería en Materiales, asegurando que se contextualice adecuadamente con los

conocimientos teóricos sobre el comportamiento del aluminio y sus aleaciones durante la soldadura.

4. Promover la inspección visual para la identificación de defectos en las soldaduras realizadas, incluso si son producto de las limitaciones del equipo. Esto es fundamental para que los estudiantes aprendan a reconocer y diagnosticar problemas, preparándolos para un entorno industrial donde el control de calidad es vital.

Conclusiones

Esta propuesta sienta las bases esenciales para su futura incorporación en el plan de estudios de Ingeniería de Materiales, representando un avance significativo en la preparación práctica de los estudiantes para el campo laboral industrial.

En resumen, aunque la implementación inicial de la práctica de soldadura de aluminio en el laboratorio pueda presentar limitaciones en la calidad del producto debido al equipo actual, su valor formativo en la comprensión de los principios y desafíos del proceso es innegable. Con una implementación consciente de estas limitaciones y una visión a futuro para la mejora de los recursos, la propuesta contribuirá significativamente a una preparación más robusta de los futuros ingenieros de materiales.

Bibliografía

- [1] I. J. S. D. H. N. J. F. & Q. M., «Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals,» *Polmear Butterworth-Heinemann*, nº 5, 2017.
- [2] INEGI, «Indicadores del sector minero-metalúrgico,» 2021. [En línea].
- [3] J. E. Hatch, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*, ASM International Vol. 1, 1984.
- [4] M. S. F. Pérez, Estudio de la soldabilidad de aluminio AA6063 en diferentes estados de tratamiento térmico soldado mediante el procesos GMAW con el aporte ER5356, 2018.
- [5] R. W. Messler, *Principles of Welding: Processes, Elementary Metallurgy, Tests, Design*, Wiley-Interscience, 2004.
- [6] J. R. Davis, *Aluminum and aluminum alloys*, ASM International, 1999.
- [7] G. & M. D. Totten, «Handbook of aluminum,» *Physical metallurgy and processes*, vol. 1, 2003.
- [8] J. M. & R. H. Villalobos, «Procesos de soldadura y su impacto en el desarrollo industrial en México,» *Ciencia, Tecnología y Sociedad* *Revista Ciencia, Tecnología y Sociedad*, vol. 1, nº 23, pp. 55-63, 2018.
- [9] S. Kou, «Welding metallurg,» Wiley-Interscience,» vol. 2 ed., 2003.
- [10] F. Habashi, «The history of aluminum,» *Light Metal Age*, vol. 56, nº 3, pp. 16-19, 1998.
- [11] H. & G. L. Álvarez, «Propuesta de prácticas de laboratorio para ingeniería mecánica: una revisión basada en recursos disponibles,» *Educación en Ingeniería*, vol. 30, nº 15, pp. 45-53, 2020.
- [12] W. D. & R. D. G. Callister, «Materials Science and Engineering: An Introduction,» *Wiley*, vol. 10, 2018.
- [13] I. J. S. D. H. N. J. F. & Q. M. Polmear, «Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals,» *Butterworth-Heinemann*, nº 5, 2017.
- [14] J. E. Hatch, «Aluminum: Properties and Physical Metallurgy,» *ASM International*, vol. 1, 1984.
- [15] R. W. Messler, «Principles of Welding: Processes, Elementary Metallurgy, Tests, Design,» *Wiley-Interscience*, 2004.
- [16] Somisa, «La historia de la soldadura,» [En línea]. Available: <https://somisa.mx/la-historia-de-la-soldadura/>.
- [17] J. Bonet, «Historia de la soldadura,» [En línea]. Available: <https://joanbonetm.wordpress.com/2019/06/18/historia-de-la-soldadura/>.
- [18] M. S. M. González, *Aplicación de la Soldadura en Estructuras de aluminio*, 2007.
- [19] J. D. P. Salazar, Estudio del proceso de soldadura SMAW con electrodo E4043 aplicado a la aleación de aluminio 6065-T6 y su efecto en las propiedades mecánicas de la junta a tope soldada del marco de la ventana del bus en carrocerías IMCE, Universidad Técnica de Ambato, 2015.
- [20] RMB, «Caligrafía de Soldadura,» [En línea]. Available: <https://rmb.com.ar/web/caligrafia-de->

soldadura/.

- [21] Q. e. u. b. y. c. s. s. beneficios, «RMB,» [En línea]. Available: <https://rmb.com.ar/web/que-es-un-bisel-y-cuales-son-sus-beneficios/>.
- [22] E. T. Alpizar, Determinación de Tecnologías de Soldadura por Arco Eléctrico, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", Facultad de Ingenierías Química y Mecánica, 2003.
- [23] ANCAP, 2018. [En línea]. Available: https://llamados.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2018/REF.%2008-2018%20-%20OFICIAL%20TALLER%20B%20-%20PLANTA%20MINAS%20-%20PERFIL%20MEC%C3%81NICA/2%20MATERIAL%20DE%20ESTUDIO%20-%20CONOCIMIENTOS%20ESPECIFICOS/7%20-%20SOLDADU.
- [24] TELWIN, «Guía rápida para la soldadura con electrodo MMA,» [En línea].