

Universidad Técnica Federico Santa María

*Departamento de Ingeniería Mecánica
Valparaíso - Chile*



**“Aplicación del proceso de soldadura por
arco sumergido en la industria
manufacturera.”**

Temístocles Esteban Medina Sepúlveda

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

Profesor Guía

Rafael Gerardo Mena Yanssen

Correferente

Gustavo Bore Bacigaluppi

20 de noviembre de 2017

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución.

Dedicatoria

A

Temístocles Medina Rivera

Marilúz Sepúlveda Henríquez

Sandra Medina Candia

Guisella Suárez Sepúlveda

Hector Medina Candia

Evelyn Medina Sepúlveda

A mi familia

Resumen

El crecimiento de la industria manufacturera nacional depende en gran medida de la capacidad interna que se tenga para producir con la mayor eficiencia posible reduciendo costos y gastos de producción. Esto es posible ya sea mejorando o integrando nuevos procesos que se orienten en esta dirección.

Bajo este precepto en la industria manufacturera metal-mecánica, las uniones a tope o de filete de placas largas, plataformas de puentes y barcasas, recipientes de presión, líneas de panel, tuberías, grandes tanques, construcción naval, vástagos y carcasas de cilindros y en general uniones de piezas con espesores de chapa desde 6 mm, pueden presentarse como procesos muy poco viables de desarrollar sin la implementación necesaria.

En respuesta a esta problemática se presenta el procedimiento de soldadura de alto rendimiento denominado Soldadura por Arco Sumergido o proceso SAW. Como muchos procesos de alto rendimiento se aplica, sobre todo, mecanizado o automatizado. Tiempos de soldadura inferiores en combinación con un tiempo de funcionamiento superior provocan que sea posible soldar cordones largos sin interrupción.

Básicamente el método SAW, consiste en la fusión de un electrodo continuo, que puede ser macizo o tubular, protegido por la escoria generada por un fundente granulado o en polvo, con el que se alimenta el arco por separado.

Como el arco está completamente cubierto por la capa de fundente el proceso toma el nombre de arco sumergido, no observándose durante la operación de soldar ni el arco, baño de fusión, chispas o gases. Además, dada esta capa que recubre el cordón de soldadura la pérdida de calor es extremadamente baja. Esto produce una eficiencia térmica del 60 % (en comparación, por ejemplo, con el 25 % del método MIG) a la vez, que se logran tasas de deposición de 100 Kg/hr a velocidades de desplazamiento muy altas de hasta 250 cm/min.

Tanto la calidad como el aspecto que se obtiene de las uniones con este procedimiento suele ser excelente.

Diferentes formas de aplicación del proceso, dependiendo de la cantidad de deposición necesaria y la geometría de la pieza hacen a este método muy versátil e interesante, a saber: SAW de un solo alambre, SAW de dos alambres, SAW de alambres en simultaneo, SAW en simultaneo de uno o dos alambres, SAW en simultaneo de dos alambres y SAW de varios alambres con el que se logran las máximas tasas de deposición.

Sumado a lo anterior, la inexistencia de capacitaciones especiales, más allá de una calificación de soldador 2G y un curso de manejo de los equipos, hacen que la aplicación de la Soldadura por Arco Sumergido sea tan simple como cualquier método de soldadura al arco.

Abstract

The growth of the domestic manufacturing industry depends to a large extent on the internal capacity to produce as efficiently as possible, reducing costs and production costs. This is possible either by improving or integrating new processes that are oriented in this direction.

Under this precept in the metal-mechanical manufacturing industry, butt joints or long plate fillet, bridge and barge platforms, pressure vessels, panel lines, pipes, large tanks, shipbuilding, cylinder rods and casings and in general, joints of pieces with sheet thicknesses from 6 mm can be presented as very unfeasible processes to develop without the necessary implementation.

In response to this problem, the high-performance welding process called Submerged Arc Welding or SAW process is presented. Like many high-performance processes, it is applied, above all, mechanized or automated. Lower welding times in combination with a longer operating time make it possible to weld long cords without interruption.

Basically, the SAW method consists of the fusion of a continuous electrode, which can be solid or tubular, protected by the slag generated by a granular or powder flux, with which the arc is fed separately.

As the arch is completely covered by the flux layer, the process takes the name of submerged arc, not observed during the welding operation nor the arc, melting bath, sparks or gases, in addition, given this layer that covers the cord of welding the heat loss is extremely low. This produces a thermal efficiency of 60 % (in comparison, for example, with 25 % of the MIG method) at the same time, that deposition rates of 100 Kg / hr are achieved at very high travel speeds up to 250 cm / min.

Both the quality and the appearance obtained from the joints with this procedure is usually excellent.

Different forms of application of the process, depending on the amount of deposition required and the geometry of the piece make this method very versatile and interesting, namely: single-wire SAW, two-wire SAW, simultaneous wire SAW, SAW in simultaneous of one or two wires, SAW in simultaneous of two wires and SAW of several wires with which the maximum deposition rates are achieved.

In addition to the above, the lack of special training, beyond a 2G welder qualification and a course of equipment management, make the application of the Submerged Arc Welding as simple as any method of arc welding.

Glosario

SAW	: <i>Submerged Arc Welding.</i> (Soldadura Por Arco Sumergido.)
MIG	: <i>Metal Inert Gas.</i> (Gas Inerte de Metal.)
MAG	: <i>Metal Active Gas.</i> (Gas Activo de Metal.)
GMAW	: <i>Gas Metal Arc Welding.</i> (Soldadura a Gas y Arco Metálico.)
SMAW	: <i>Shielded Metal Arc Welding.</i> (Soldadura por Arco con Electrodo Metalico Revestido.)
NEMA	: <i>National Electrical Manufacturers Association, EEUU.</i> (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, Estados Unidos.)
AWS	: <i>American Welding Society.</i> (Sociedad Americana de Soldadura.)
ISO	: <i>International Organization For Standardization.</i> (Organización Internacional de Normalización.)
EN	: <i>European Estandards.</i> (Normas Europeas.)
WFS	: <i>Wire Feed Speed.</i> (Velocidad de Alimentación del Hilo.)
TS	: <i>Travel Speed.</i> (Velocidad de avance.)
ESO	: <i>Stick - Out.</i>
P	: <i>Potencia eléctrica.</i>
V	: <i>Voltaje.</i>
R	: <i>Resistencia Eléctrica.</i>
I	: <i>Intensidad de corriente.</i>
A	: <i>Ampere.</i>
φ	: <i>Diámetro.</i>
v	: <i>velocidad de avance.</i>
ρ	: <i>Resistividad.</i>
S	: <i>Área Transversal.</i>
A.T	: <i>Aporte Térmico.</i>
AC, CA	: <i>Alternating Current.</i> (Corriente Alterna.)
DC, CC	: <i>Direct Current.</i> (Corriente continua.)
DC+, CC+	: <i>Corriente continua con Polaridad Positiva.</i>
DC-, CC-	: <i>Corriente continua con Polaridad Negativa.</i>
PVC	: <i>Policloruro de Vinilo.</i>
U_0	: <i>Tensión en Vacío.</i>
U_S	: <i>Tensión de Trabajo.</i>
I_{KSt}	: <i>Corriente Corto Circuito.</i>
I_D	: <i>Corriente de Transición.</i>
I_S	: <i>Corriente de Trabajo.</i>

T	: <i>Nuevo Ciclo de Trabajo.</i>
I_n	: <i>Corriente Nominal para el Ciclo.</i>
T_0	: <i>Ciclo de Trabajo Original.</i>
SiO_2	: <i>Óxido de Silicio.</i>
TiO_2	: <i>Óxido de Titanio.</i>
CaO	: <i>Óxido de Calcio.</i>
MgO	: <i>Óxido de Magnesio.</i>
Al_2O_3	: <i>Óxido de Aluminio.</i>
MnO	: <i>Óxido de Manganeseo.</i>
K_2O	: <i>Óxido de Potasio.</i>
Na_2O	: <i>Óxido de Sodio.</i>
Li_2O	: <i>Óxido de Litio.</i>
FeO	: <i>Óxido de Hierro.</i>
ZrO_2	: <i>Dióxido de Zirconio.</i>
CaF_2	: <i>Fluoruro de Calcio.</i>
CO	: <i>Monóxido de Carbono.</i>
Mn	: <i>Manganeseo.</i>
Si	: <i>Silicio.</i>
CO_2	: <i>Dióxido de Carbono.</i>
O_2	: <i>Oxígeno.</i>

Índice general

1. Marco teórico: Análisis y estudio del estado del arte de la soldadura por arco sumergido	2
1. La soldadura como unión mecánica	2
2. Naturaleza de las superficies metálicas	2
3. Clasificación de los procesos de soldadura	3
3.a. Soldadura eléctrica por arco	6
3.b. Soldadura por arco sumergido	13
2. Análisis e ingeniería conceptual centrada en la identificación de las principales variables involucradas en este método de soldadura	16
1. Electroodos	16
2. Fundentes	17
2.a. Según su sistema de fabricación	18
2.b. Según su nivel de actividad química	20
2.c. Granulometría del fundente	20
2.d. Normas y tipos de fundentes y electrodos	24
3. Influencia de los parámetros de soldadura en las características y propiedades del metal depositado	24
3.a. Parámetros principales	25
3.b. Parámetros secundarios	31
3.c. Altura del fundente	32
3.d. Stick-out	32
3.e. Posición e inclinación del electrodo o arco de soldadura	33
3.f. Posición de la masa	33
3.g. Aporte térmico	34
3. Equipos, accesorios, requerimientos de capacitación, ensayos y costos	35
1. Equipos de Base	35
2. Equipos complementarios	35
3. Ensayos	36
3.a. Partículas magnéticas	36
3.b. Ultrasonido	37
3.c. Tintas penetrantes	37
3.d. Radiografía	38
4. Requerimientos de calificación	38
5. Costos	39
5.a. Especificaciones de la fuente de poder	40

5.b.	Especificaciones del tractor	41
4.	Aplicaciones industriales. Problemas y oportunidades	42
1.	Oportunidades respecto al proceso de soldadura por arco sumergido	47
1.a.	SAW de dos alambres	47
1.b.	SAW de alambres en simultáneo	48
1.c.	SAW en simultáneo de uno o dos alambres	49
1.d.	SAW en simultáneo de dos alambres	50
1.e.	SAW de varios alambres	50
2.	Defectos de las soldaduras	51
2.a.	Porosidad	51
2.b.	Socavado	52
2.c.	Escoria apretada	53
2.d.	Perforación	53
2.e.	Fracturas longitudinales.....	54
2.f.	Fracturas transversales	55
2.g.	Pobre apariencia de soldadura	56
2.h.	Inclusiones de escoria.....	57
2.i.	Traslape frío.....	57
2.j.	Faltad de penetración	58
2.k.	Marca de hoyos	59
5.	Recomendaciones objetivas para la implementación del proceso de Soldadura por Arco Sumergido en la industria manufacturera	60
1.	Seguridad e higiene.....	60
1.a.	Humos y gases.....	60
1.b.	Polvo.....	60
1.c.	Fluoruros.....	60
1.d.	Electricidad	61
1.e.	Protección personal	61
2.	Almacenamiento, manipulación, recuperación y reutilización de fundentes y alambres	61
2.a.	Alambres	61
2.b.	Fundentes.....	61
3.	Aplicación de soldadura circunferencial	62
4.	Aplicación de soldadura en ángulo	65
5.	Aplicación de soldadura traslapadas	66
6.	Análisis y conclusiones	68
	Referencias	70

Índice de figuras

3.1. Clasificación general de los procesos de soldadura. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	4
3.2. Carta maestra de los procesos de soldadura. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	5
3.3. Esquema demostrativo de la estructura granular y cristalina de una superficie metálica. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	6
3.4. Diagrama del circuito de soldadura por arco eléctrico. Fuente: Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	7
3.5. Polaridad directa. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	8
3.6. Polaridad invertida. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	9
3.7. Fuente de poder a corriente y tensión constante. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	10
3.8. Características del arco. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	11
3.9. Soldadura por arco sumergido de un solo alambre. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	14
3.10. Corte mamográfico transversal de un cordón de soldadura. Fuente: Air Liquide Welding, Libro de información.	14
3.11. Esquema de los equipos básicos para soldadura por arco sumergido. Fuente: Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.	15
3.1. Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones en la intensidad de corriente. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	26
3.2. Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones en el nivel de voltaje. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	27
3.3. Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones en el diámetro del hilo. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	28
3.4. Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones en la TS.	29
3.5. Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones, en conjunto, del modo de soldadura y la polaridad de conexión. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	31
3.6. Efectos del ángulo del electrodo en soldaduras a tope. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	33
4.1. Uniones de filete. Fuente: Manual de sistemas y materiales de soldadura, INDURA.	38
4.2. Uniones Biseladas. Fuente: Manual de sistemas y materiales de soldadura, INDURA.	39

5.1. Equipo mecanizado de soldadura por arco sumergido. Fuente: SOLDADURAS SOL-TEC SPA.	40
0.1. Soldadura a tope en placa larga. Fuente: Material propio	42
0.2. Soldadura circunferencial de tuberías. Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	43
0.3. Soldadura de estanques. Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	43
0.4. Soldadura de vástagos. Fuente: Material propio.	44
0.5. SAW de un solo alambre. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	47
1.1. SAW de dos alambres. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	48
1.2. SAW de alambres en simultáneo. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	49
1.3. SAW en simultáneo de uno o dos alambres. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	49
1.4. SAW en simultáneo de dos alambres. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	50
1.5. SAW de varios alambres. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	51
2.1. Porosidad. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	52
2.2. Socavado. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	52
2.3. Escoria apretada. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición.....	53
2.4. Perforación. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	54
2.5. Fracturas longitudinales. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	54
2.6. Fracturas transversales. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	55
2.7. Pobre apariencia de soldadura. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	56
2.8. Inclusiones de escoria. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición.....	57
2.9. Traslape frío. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	58
2.10. Faltad de penetración. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición....	58
2.11. Marca de hoyos. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	59
3.1. Desplazamiento adecuado para SAW circunferencial. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	63
3.2. Desplazamiento excesivo para SAW circunferencial. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	64
3.3. Desplazamiento insuficiente para SAW circunferencial. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	65
4.1. Colocación de la antorcha para soldaduras en ángulo SAW sobre uniones en T. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	66
5.1. Colocación de la antorcha para soldaduras de filete SAW en juntas a traslape. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	67

Índice de tablas

1.1. Gama de intensidades en función del diámetro del hilo. Fuente: Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.	17
2.1. Variedad de fundentes de aplicación industrial. Fuente: Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.	22
2.2. Variedad de fundentes de aplicación industrial, continuación. Fuente: Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.	23
0.1. Recomendación de proceso de soldadura según tipo de material. R= Recomendado; S= Satisfactorio; NR= No Recomendado; Na= No Aplicable. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.	46
2.1. Porosidad: causas y soluciones	51
2.2. Socavado: Causas y soluciones	52
2.3. Escoria apretada: Causas y soluciones	53
2.4. Perforación: Causas y soluciones	53
2.5. Fracturas longitudinales: Causa y soluciones	54
2.6. Fracturas transversales: Causa y soluciones	55
2.7. Pobre apariencia de soldadura: Causa y soluciones	56
2.8. Inclusiones de escoria: causas y soluciones	57
2.9. Traslape frío	57
2.10. Falta de penetración	58
2.11. Marca de hoyos	59
3.1. Desplazamiento desde la línea de 12 o 6 en punto para soldadura circunferenciales. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición	65

Introducción

La soldadura como método de unión ha existido desde tiempos del antiguo Egipto, se han descubierto piezas de distintos metales, unidas, con mucha dificultad en tumbas de distintos emperadores de ese tiempo, por la forma que estaban unidas se afirma que el método que se usaba era a base de presión y fue el método que predominó hasta fines del siglo IX, bajo el nombre de Soldadura por Forja, este, consistía en calentar al rojo las dos piezas metálicas para luego mediante martillo o rodillos golpearlas hasta generar la fusión de ellas.

Desde ahí se pasó a la soldadura por gas; como las soldaduras de Oxi-Hidrogeno, Oxígeno-carbón y aire-gas, evolucionando finalmente a la soldadura Oxiacetilénica.

Finalmente, cerca de 1880 se crea la primera máquina para soldar mediante arco eléctrico lo que produjo un cambio radical en la industria de la época, a partir de ese punto rápidamente se avanzó a métodos más sofisticados como soldadura por resistencia, en la que no existe material de aporte y, la unión se produce solo entre los dos materiales involucrados, método muy atractivo para uniones de piezas químicamente similares y de una alta pureza.

Se debe mencionar que la soldadura por arco de dos materiales contempla la incorporación de un tercer material, el electrodo, el que funciona como mediador químico-físico en el caso que se trabaje con diferentes materiales base, creando una costura resistente en casos en que sería imposible siquiera crear una unión simple. Esto sumado a la simpleza de su aplicación y la movilidad de sus equipos hacen que esta tecnología este en un proceso constante de mejora continua, implementándose una gran cantidad de variantes de este método entre los que destaca la Soldadura por Arco Sumergido o SAW.

Como una forma de incorporar el concepto de Soldadura por Arco Sumergido y su opción real de implementación en la industria manufacturera se estudiará la naturaleza de la unión soldada, pasando por los distintos tipos de métodos de soldadura, hasta llegar al método SAW, sus fundamentos, equipos y formas de aplicación. Se analizarán además, las diferentes técnicas para aumentar o disminuir el grosor, penetración, dilución y resistencia mecánica del cordón de soldadura, así como la forma de aumentar la deposición, y velocidad de soldadura en función de los parámetros básicos de soldadura, como intensidad de corriente, voltaje, polaridad, tipo de corriente, distancia libre de hilo, diámetro de hilo, entre otros factores. Entregando recomendaciones objetivas y concretas para la aplicación del proceso tanto en soldaduras en ángulo de placas planas como en soldaduras circunferenciales.

Capítulo 1

Marco teórico: Análisis y estudio del estado del arte de la soldadura por arco sumergido

1. La soldadura como unión mecánica

El primer paso a hacia la comprensión de los procesos de soldadura lo constituye el análisis de los fenómenos, que intervienen cuando se produce el contacto de dos superficies sólidas.

Para ello recordemos, que los metales están constituidos por granos (figura 3.3). Cada uno de éstos es a su vez un arreglo periódico especial de átomos, que da origen a lo que conocemos como retícula cristalina.

El tamaño medio de estos granos es variable y cada grano está separado de sus vecinos por una zona de transición, que se conoce como límite de grano. Los límites de grano desempeñan un papel importante en la determinación de las propiedades mecánicas de un metal.

Si consideramos ahora un átomo cualquiera en el interior de un grano, el mismo se halla ligado a sus vecinos por fuerzas de enlace, que caracterizan a estos sólidos. Sin embargo, resulta evidente que los átomos metálicos, que se encuentran en la superficie libre, no podrían completar sus enlaces. Si en estas condiciones ponemos en adecuado contacto dos superficies de este tipo, se establecerán dichos enlaces constituyendo la superficie así formada algo equivalente a un límite de grano. Es la posibilidad de reproducir este fenómeno en forma controlada, lo que da origen a los procesos de soldadura.

2. Naturaleza de las superficies metálicas

En la explicación anterior hemos considerado dos superficies metálicas planas, ideales como para que se establezca un íntimo contacto entre ellas. Sin embargo, las superficies metálicas raramente se encuentran en ese estado, lo que impide en la práctica la reproducción del proceso ya descrito.

Para comprender los procesos reales, es necesario analizar las características de las superficies reales, tal como ocurren en la naturaleza. Cualquier superficie real examinada en la escala atómica es extremadamente irregular. Está constituida por picos y valles variables entre unos doscientos diámetros atómicos correspondientes a las superficies más perfectas que el hombre puede preparar,

hasta cien diámetros atómicos para superficies desbastadas.

Dados que estas irregularidades se encuentran distribuidas al azar, es sumamente improbable que poco más que algunos átomos se pongan en contacto íntimo necesario para experimentar fuerzas de atracción sensibles.

Otro impedimento, que se presenta para lograr la soldadura ideal, lo constituye la presencia inevitable de capas de óxido y humedad adheridas a las superficies metálicas.

De este análisis surgen las dificultades, que se presentan para lograr una unión metálica adecuada al poner dos cuerpos en contacto. Sin embargo, la ciencia de la soldadura se ocupa de estudiar los medios prácticos, para producir uniones átomo a átomo a través de superficies metálicas pre-existentes y en un número suficiente para otorgar resistencia mecánica satisfactoria.

Los recursos empleados para lograr este objetivo nos permitirán hacer una clasificación de los procesos de soldadura.

3. Clasificación de los procesos de soldadura

Una forma de lograr el contacto íntimo de dos superficies metálicas para la producción de una soldadura, es someter las mismas a una presión recíproca. Si esta es de magnitud adecuada, será capaz de romper las capas de óxido y humedad y deformar las superficies, logrando así el contacto necesario. Esto da origen a lo que se conoce como Soldadura por Presión.

Este proceso puede o no ser atendido por energía térmica, pero debe tenerse en cuenta que, cuando así ocurre, la temperatura del proceso debe mantenerse por debajo del punto de fusión de los materiales que intervienen. El principal efecto del uso de energía térmica es el reducir la tensión de fluencia de los materiales que se sueldan, así como disociar los óxidos y volatilizar la humedad.

Otro camino para lograr la soldadura, es emplear energía térmica para fundir localmente los metales que se deseen unir y, de esta manera, lograr la eliminación de las capas mencionadas y el íntimo contacto de las piezas por la fusión y solidificación de los materiales en contacto. Generalmente, éste se conoce como Soldadura por Fusión.

Son múltiples las posibilidades de aplicación de estos procesos de soldadura. Su campo de aplicación depende, entre otras cosas, del material a soldar, de su espesor, de los requisitos que debe satisfacer la costura, y de la construcción. La multiplicidad de la ejecución de la costura, tanto en la forma como en el método y las aplicaciones, ha conducido al desarrollo de muchos procesos en esta técnica. La selección del proceso más favorable, adecuado y económico de soldadura presupone el conocimiento de la manera de ejecutarla.

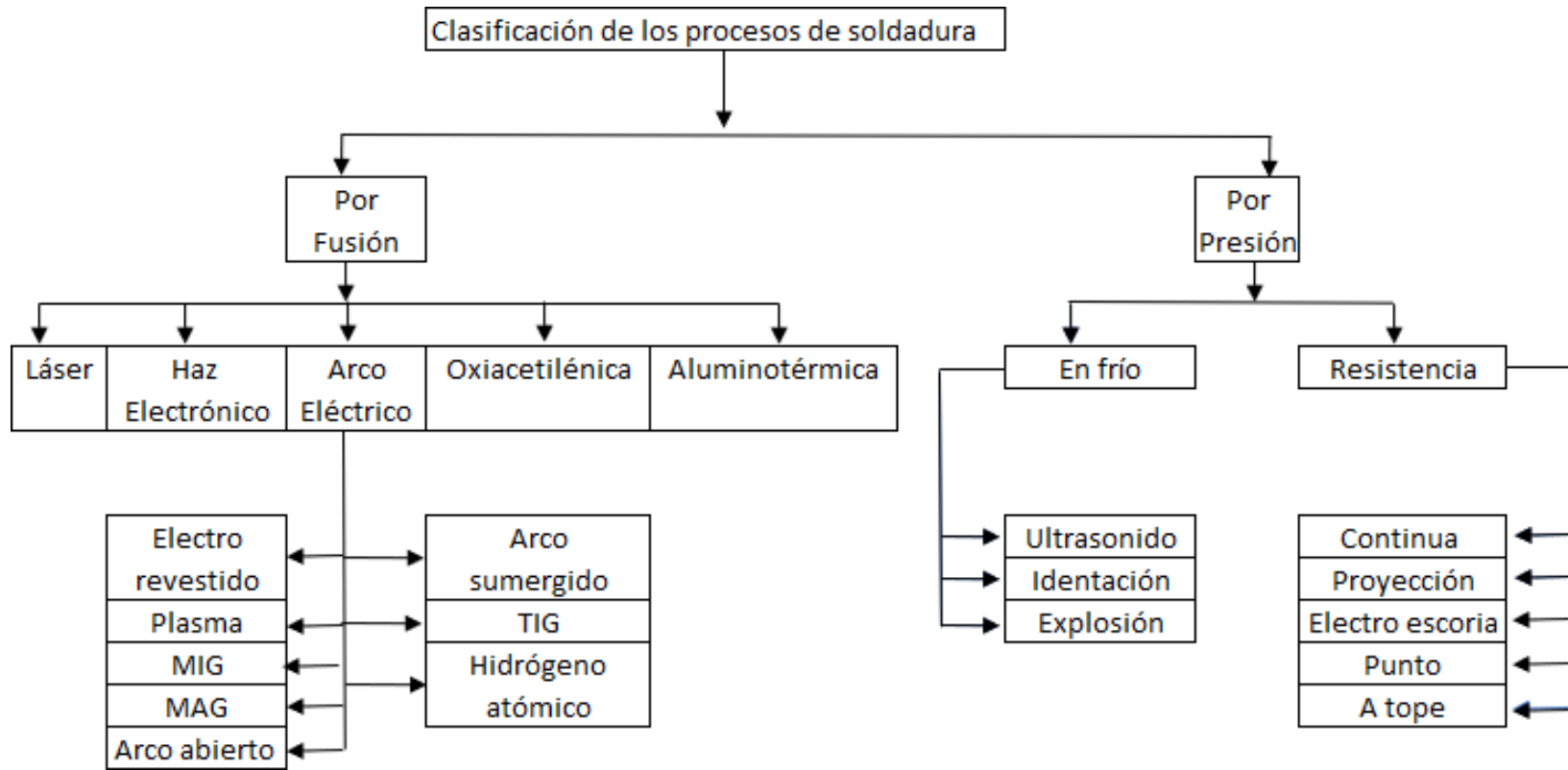


Figura 3.1: Clasificación general de los procesos de soldadura. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

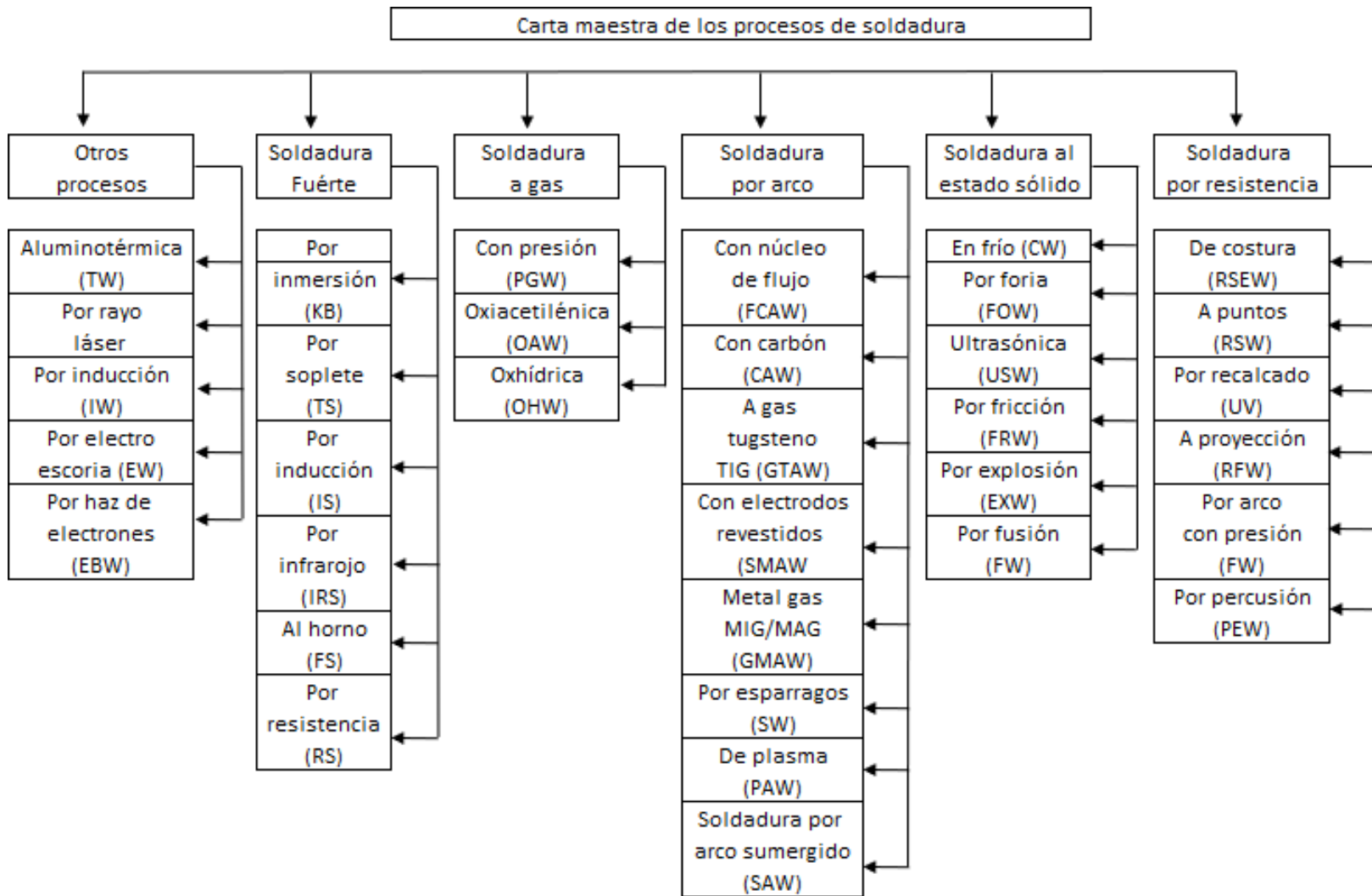


Figura 3.2: Carta maestra de los procesos de soldadura. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

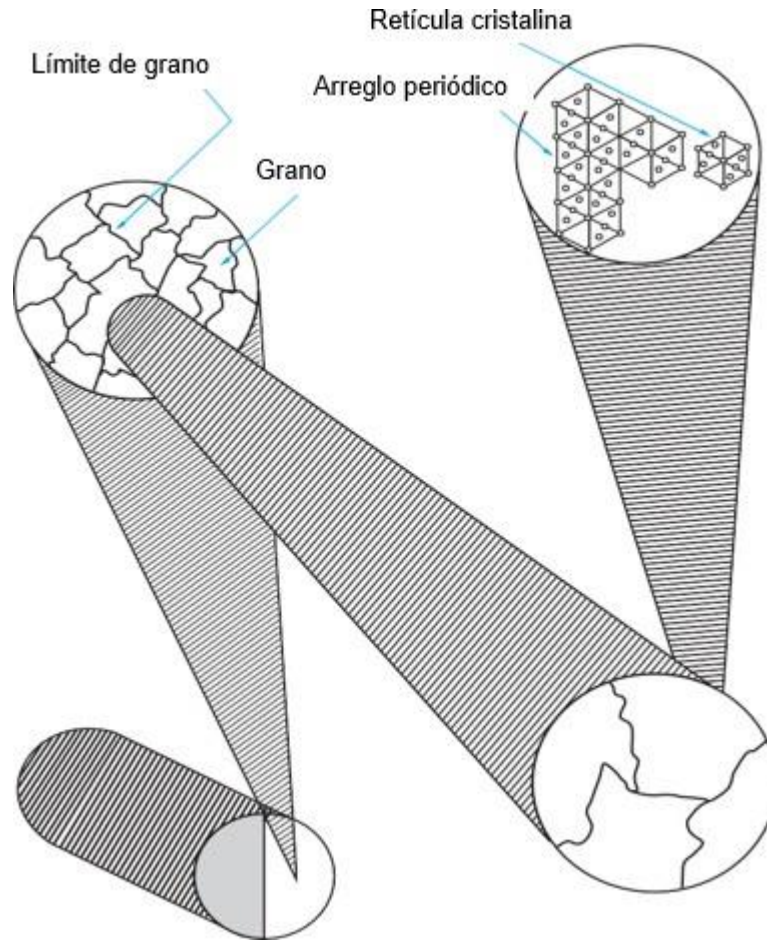


Figura 3.3: Esquema demostrativo de la estructura granular y cristalina de una superficie metálica.
Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

3.a. Soldadura eléctrica por arco

Dentro de los procesos de soldadura por fusión se encuentra la soldadura eléctrica por arco, donde la unión es producida por el calor generado por un arco eléctrico, con o sin aplicación de presión y con o sin metal de aporte.

El circuito se cierra momentáneamente, tocando con la punta del electrodo a la pieza de trabajo. El calor funde un área restringida del material base, el electrodo y el fundente, formando pequeños glóbulos metálicos, cubiertos de escoria líquida, los cuales son transferidos al metal base por fuerzas electromagnéticas, con el resultado de la fusión de dos metales con su solidificación a medida que el arco avanza.

La energía eléctrica se transforma en energía térmica, pudiendo llegar esta energía hasta una temperatura de aproximadamente 4000°C .

La energía eléctrica es el flujo de electrones a través de un circuito cerrado. Cuando ocurre una pequeña ruptura dentro de cualquier parte, o apertura del circuito, los electrones se mueven a gran velocidad y saltan a través del espacio libre entre los dos terminales, 1.5 - 3.0 mm produciendo una

chispa eléctrica, con el suficiente Voltaje para hacer fluir los electrones continuamente. A través de esta apertura, se forma el arco eléctrico, fundiéndose el metal a medida que se avanza.

El arco eléctrico es, por lo tanto, un flujo continuo de electrones a través de un medio gaseoso, que genera luz y calor. Normalmente cumple con la ley de ohm.

$$V = R \cdot I \quad (3.1)$$

Donde R es la resistencia del arco, I es la intensidad de la corriente y V es la tensión o voltaje.

La potencia del arco expresada en Watt es.

$$P = V \cdot I \quad (3.2)$$

Esta energía concentrada en una pequeña área es la que se usa en todos los procesos por arco eléctrico, para fundir tanto, al metal base como a los materiales de aporte.

El circuito de soldadura por arco eléctrico

La corriente fluye a partir del borne de la máquina de soldar, donde se fija el cable de tierra o trabajo.

Como puede observarse en la figura 3.4 a partir de la máquina de soldar la corriente fluye al soporte del electrodo y por éste al electrodo cubierto; por el extremo del alambre salta la electricidad a la pieza formando el arco eléctrico; sigue fluyendo la electricidad por la pieza de trabajo al cable de tierra o trabajo y vuelve a la máquina.

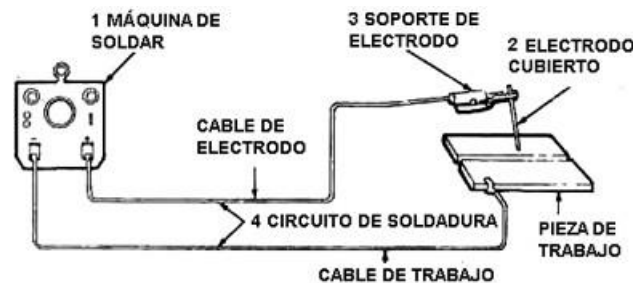


Figura 3.4: Diagrama del circuito de soldadura por arco eléctrico. Fuente: Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

El circuito esta establecido solo cuando el arco se encuentra encendido.

Voltaje y ampere

El agua circula a lo largo de un tubo, si existe presión que lo impulse; en la misma forma, la corriente eléctrica fluye o circula a través de un circuito, si existe una "presión", que impulse el flujo de electrones dentro de un conductor. Esta presión, que induce una corriente eléctrica, se llama diferencia de potencial, tensión o voltaje.

El voltaje se expresa en volts y se mide con el voltímetro; algunas máquinas de soldar poseen voltímetro y un regulador de voltaje.

La cantidad de agua, que pasa por un tubo, se mide por una magnitud en una unidad de tiempo (metros cúbicos por segundo). En igual forma se utiliza, para expresar la magnitud de corriente eléctrica, la cantidad de electricidad por segundo.

La unidad utilizada es el Culombio por Segundo, lo que se expresa en Amperios, y se mide con un instrumento llamado amperímetro.

Todas las máquinas de soldar cuentan con reguladores, que permiten variar el amperaje o intensidad eléctrica necesaria para soldar.

Clases de corriente eléctrica

- Corriente Alterna (AC): El flujo de corriente varía de una dirección a la opuesta. Este cambio se efectúa entre 50 y 60 veces por segundo.

En Chile, a nivel industrial, se utiliza, por lo general, la corriente alterna de 380 Volts y 50 Hertz. Esta corriente es transportada por redes eléctricas monofásicas o trifásicas. Las máquinas de soldar pueden utilizar ambos tipos de corriente.

- Corriente Continua (DC): El flujo de corriente conserva siempre una misma dirección: del polo negativo al positivo.

Polaridad

En la corriente continua es importante saber la dirección del flujo de corriente y se expresa en términos de polaridad. Si el cable del porta electrodo es conectado al polo negativo (-) de la fuente de poder y el cable de tierra al polo positivo (+) el circuito es denominado de Polaridad Directa o Normal.

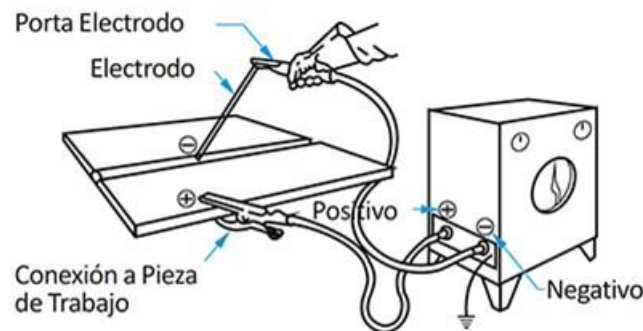


Figura 3.5: Polaridad directa. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

Cuando el cable del porta electrodo es conectado al polo positivo (+) de la fuente de poder y el cable de tierra al polo negativo, el circuito es denominado de Polaridad Invertida o Indirecta.

En algunas máquinas es posible cambiar los cables en los bornes, por que poseen una llave de conmutación que permite cambiar de polaridad con facilidad.

Como es lógico inferir, en la máquina de corriente alterna no es posible diferenciar los cables por sus conexiones de grapa y porta electrodo por que la electricidad fluye por ellos alternando su sentido o dirección.

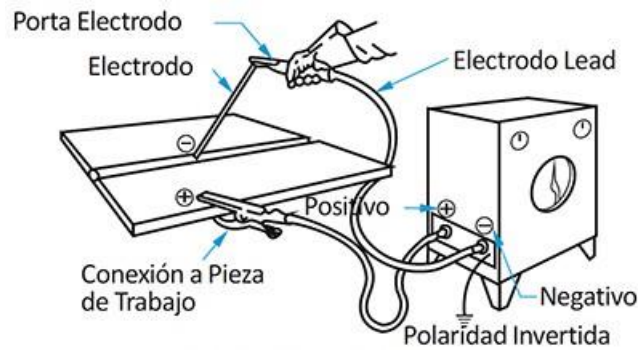


Figura 3.6: Polaridad invertida. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

Fenómeno del arco eléctrico para soldar

En los polos del arco, el voltaje varía según la longitud de este. Al rozar el electrodo con la pieza, el voltaje es cero y va aumentando a medida que la longitud del arco se hace mayor, hasta que, por alejarse demasiado el electrodo, el arco se interrumpe y la máquina vuelve a su voltaje de vacío, que es siempre más elevado que el voltaje de trabajo.

La intensidad de corriente o amperaje necesario para fundir el electrodo y, por lo tanto, la pieza a soldar debe elevarse a medida que aumenta el diámetro del electrodo utilizado.

Máquinas de soldar por arco eléctrico

- una vez iniciado el arco, debe permitir una conversión automática e instantánea del voltaje en vacío a un voltaje de trabajo, que permite mantener el arco (voltaje de trabajo es el que proporciona la máquina cuando el arco está encendido).
- Permitir la regulación de la intensidad de corriente o amperaje necesario para soldar; ese amperaje varía según el espesor de la pieza, posición del trabajo, diámetro del alambre, etc.)
- Asegurar una alimentación constante de corriente, que permita mantener el arco estable.

Además de las características señaladas, una fuente de poder o máquina de soldar debe reunir las condiciones de resistencia y solidez, que le permitan trabajar aun estando sometida a las más duras exigencias y según las condiciones en que se desenvuelva la labor del soldador.

Clases de máquinas de soldar

En general se puede encontrar dos tipos de máquinas de soldar:

- Máquinas estáticas:
 - Transformadores: Son máquinas que proporcionan corriente alterna para soldar.
 - Rectificadores: Son máquinas transformadores que, mediante rectificadores, transforman la corriente alterna a corriente continua para soldar.
 - Transformadores-Rectificadores: estas máquinas proporcionan tanto, corriente continua como corriente alterna para soldar. Su construcción eléctrica especial permite cambiar de una corriente a otra con solo mover una llave de conmutación.

■ Máquinas rotativas (convertidores):

- De motor eléctrico.
- De motor a combustión interna, pudiendo ser a gasolina o petróleo (diésel).

Las máquinas estáticas son las que no poseen elementos en movimiento continuo; excepcionalmente algunas poseen un ventilador.

Las máquinas rotativas o convertidores son las que, si poseen elementos en rotación constante y están compuestas básicamente de un motor, que proporciona una determinada velocidad de rotación a un dínamo, el cual produce la corriente eléctrica apropiada para soldar.

Característica estática o dinámica

El objetivo primordial, que debe cumplir una fuente de poder de soldadura, es entregar una corriente controlable a la tensión que demanda el proceso de que se trate.

Dependiendo de las características Voltaje-Ampere, las fuentes podrían ser:

- Fuente de corriente constante.
- Fuente de voltaje constante.

La norma NEMA (National Electrical Manufacturers Association) define a la primera como: "Aquella que posee una característica voltaje-ampere descendente, entregando una corriente relativamente constante para cambios moderados en la tensión de carga".

Las fuentes de tensión constantes son, en cambio, definidas como: "Aquellas en que la característica voltaje-ampere es esencialmente horizontal, produciendo una tensión relativamente constante para cambios moderados en la corriente de carga".

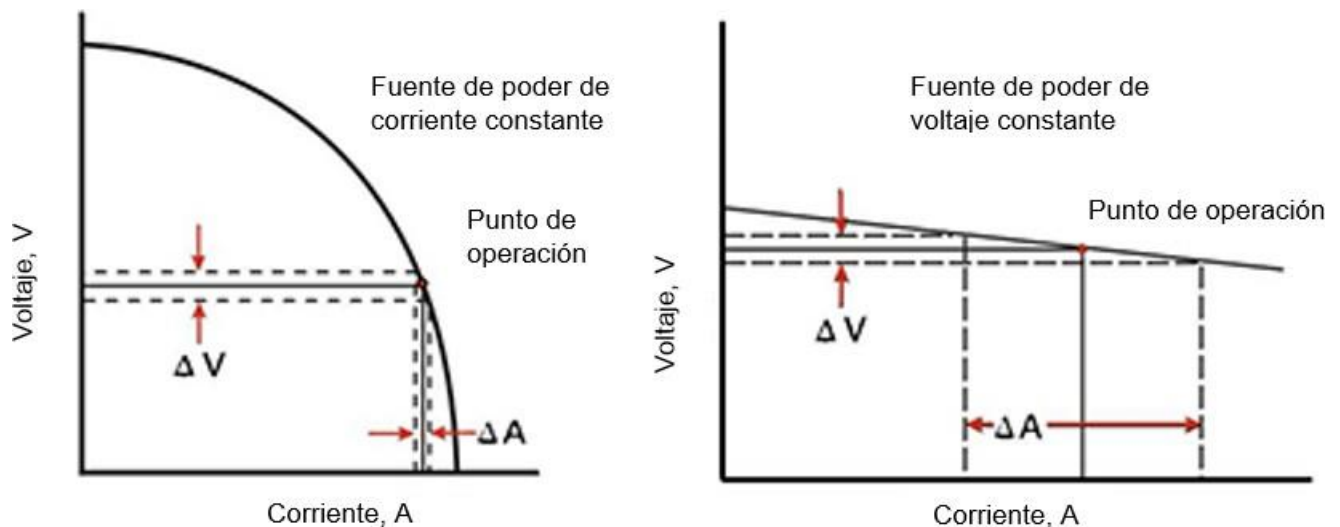


Figura 3.7: Fuente de poder a corriente y tensión constante. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

Las curvas indicadas en la figura 3.7 representan la característica "estática" de las fuentes de soldadura. Las mismas tienen, como veremos una gran importancia en relación con el modo de operación del proceso de que se trate. No obstante, un arco eléctrico es, por su misma naturaleza, inestable. Por lo tanto, las características "dinámicas" de una fuente, es decir, la capacidad de respuesta de la máquina a rápidas variaciones de la corriente o tensión en el circuito de carga, tiene influencia decisiva sobre la estabilidad del arco y, por lo tanto, del proceso de soldadura.

Para cebar y mantener el arco se necesitan determinadas tensiones e intensidades. Su característica principal es que el arco decrece según una pendiente muy rápida y nos muestra la tensión que se necesita para hacer pasar una determinada intensidad a través del arco. La característica de que cae rápidamente significa, en la práctica, que para cebar el arco se necesita, forzosamente, una tensión mayor U_0 que para la soldadura propiamente tal.

Como corresponde a la peculiaridad de la soldadura, han de considerarse tres etapas distintas: funcionamiento en vacío, cebado y soldadura. En el primer caso, entre el borne del dispositivo de soldar y la pieza existe tensión de funcionamiento en vacío (U_0) y una intensidad de corriente igual a cero.

Al cebar (corto-circuito), desciende prácticamente la tensión hasta cero y la intensidad de corriente alcanza cierto máximo bien determinado, que a menudo se encuentra por arriba del valor de la corriente de soldadura. Al ocurrir esto, aumenta la tensión (tensión de arco) manteniéndose siempre por debajo de U_0 , y la intensidad de corriente se estabiliza en un valor que corresponde al de soldadura.

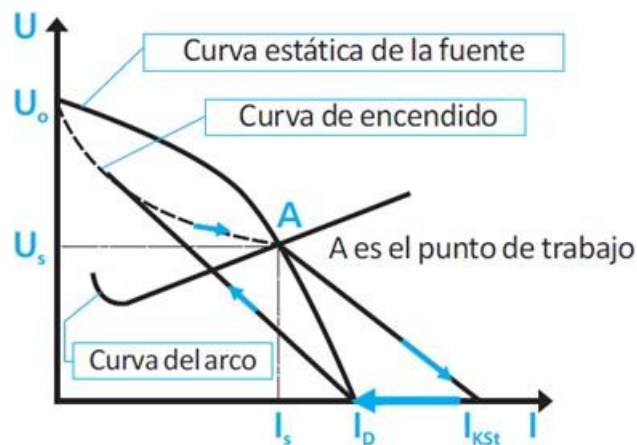


Figura 3.8: Características del arco. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

De esa circunstancia se deduce que la fuente ha de adaptarse, en lo posible sin inercia, a las condiciones rápidamente variables del arco. Para todos los cambios de carga que se efectuarán lentamente, es válida la característica "estática"; en cambio, si ocurre rápidamente, es decisiva la "dinámica".

Ciclo de trabajo

Es indudable, que no todos los procesos de soldadura impondrán la misma demanda a una fuente. Por ejemplo, en los procesos automáticos el tiempo de arco (tiempo real de soldadura) será mucho mayor que en los procesos normales, en los cuales la fatiga del operador, la necesidad

de cambio de electrodo, etc. hacen necesario frecuentes interrupciones. Por este motivo, es usual definir un "Ciclo de Trabajo" como el porcentaje de tiempo, durante el cual la máquina debe suministrar corriente nominal a la carga. Este ciclo de trabajo se determina sobre 10 minutos, de modo tal que, por ejemplo, para una fuente con un ciclo de trabajo de un 60 %, la misma debe ser capaz de entregar la corriente nominal durante 6 minutos de cada 10. Para procesos automáticos, el ciclo de trabajo se especifica normalmente en 100 %.

Si bien el ciclo de trabajo se determina normalmente sobre intervalos de 10 minutos, en equipos de alta potencia para soldadura automática o semiautomática suele emplearse una hora como base de tiempo.

En estos casos, la máquina se ensaya durante una hora a la corriente nominal, para luego hacerlo durante tres horas al 75 % de dicho valor.

Al final de cada uno de estos ciclos, la temperatura de los componentes de los equipos debe mantenerse dentro de los límites aceptados.

Es importante destacar, que el ciclo de trabajo de una máquina para soldar está basado fundamentalmente en la corriente nominal de carga. Sin embargo, si dicha máquina se destina a ser empleada con valores de corriente distintos de los nominales, es posible determinar el nuevo factor de servicio para esas condiciones mediante la expresión:

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{I_n}{I} \right)^2 \quad (3.3)$$

Donde:

T = Es el nuevo ciclo de trabajo.

I_n = Corriente nominal para el ciclo (T_0).

T_0 = Ciclo de trabajo original en %.

I = nueva corriente, con que será empleada la máquina.

No obstante, dado que el ciclo de trabajo de una fuente depende fundamentalmente de la corriente que la misma debe proveer al circuito de carga, se han establecido normas con fines comparativos, que determinan bajo que tensión debe ser suministrada dicha corriente.

Tensión de vacío o de circuito abierto

En general, en una fuente de poder para soldadura es deseable disponer de una tensión de vacío elevada, para facilitar el arranque del arco. Sin embargo, por razones de seguridad, la misma se limita a valores que reduzcan el riesgo de electrocución. Las normas NEMA, por ejemplo, limitan dicha tensión a 80 volts para equipos de soldadura manual, y a 100 volts para equipos de soldadura semiautomática.

Caída de tensión

Si la máquina tiene un voltímetro, éste indicará el voltaje de salida total, suma del voltaje de arco más las caídas en cables, electrodo, pieza y conexión de masa. Puesto que la soldadura es siempre una operación de alta corriente, las caídas de voltaje son muy pronunciadas. Particularmente los cables pueden ocasionar una considerable pérdida de voltaje, debido a su resistencia y reactancia. Una caída en los cables de 2 volts es el máximo permisible.

Otras causas de la caída de tensión y del excesivo calentamiento son el mal mantenimiento de los cables, conexiones de masa y porta-electrodo.

En resumen, las corrientes elevadas y los voltajes bajos aumentan la importancia de cualquier caída de tensión insospechada.

3.b. Soldadura por arco sumergido

La soldadura por arco sumergido, o método SAW, consiste en la fusión de un electrodo continuo, que puede ser macizo o tubular, protegido por la escoria generada por un fundente, granulado o en polvo, con el que se alimenta el arco por separado.

Como el arco está completamente cubierto por la capa de fundente, la pérdida de calor es extremadamente baja. Esto produce una eficiencia térmica del 60 % (en comparación, por ejemplo, con el 25 % del método MIG). Por este motivo, la soldadura por arco sumergido se designa como procedimiento de alto rendimiento.

Permite depositar grandes volúmenes de metal de soldadura de excelente calidad (tasas de deposición de hasta 100 Kg/hr) a bajo coste para una amplia gama de aplicaciones.

El sistema puede funcionar totalmente automático o bien semiautomático, mediante una pistola manual, similar a la que se usa en soldadura MIG, MAG, pero con diámetros de hilo mayores (hasta 6.4 mm) y, de forma parecida a como en el proceso MIG aportaría gas de protección, se aporta en este caso el fundente que nos viene alimentado de un tanque o tolva.

El arco se establece entre el electrodo y la pieza a soldar. Como electrodos, pueden utilizarse uno o varios alambres o hilos simultáneamente.

El fundente protege física y metalúrgicamente el arco y el baño de fusión de la atmósfera circundante. Físicamente, haciendo que la escoria proteja de la acción de los gases atmosféricos, formando un cordón libre de poros e impidiendo una pérdida de calor demasiado rápido. Metalúrgicamente, impidiendo pérdidas de elementos de aleación, compensando o agregándolos al metal depositado. El resto de fundente, no fundido, puede recuperarse y reciclarse en el proceso.

Como el arco es invisible por estar cubierto, el proceso se denomina Soldadura por Arco Sumergido, no observándose durante la operación de soldar ni el arco, baño de fusión, chispas o gases.

La figura 3.9 muestra cómo funciona el proceso de arco sumergido.

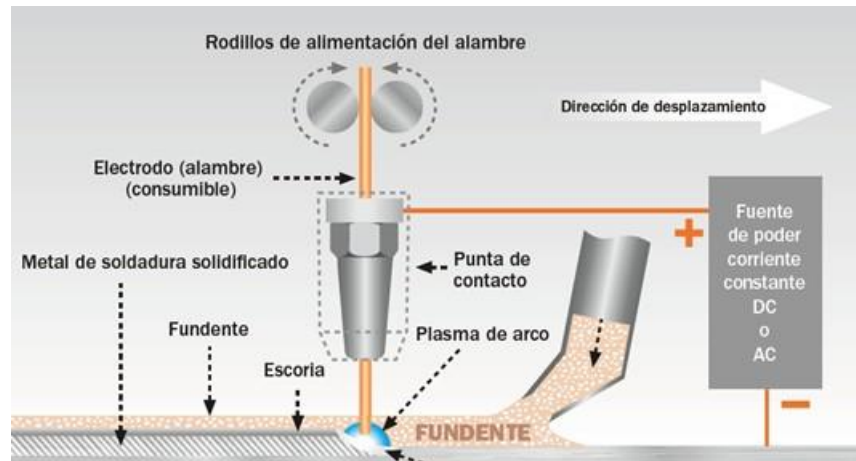


Figura 3.9: Soldadura por arco sumergido de un solo alambre. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

Mientras que en la figura 3.10 se muestran las distintas zonas existentes en el proceso de soldadura.

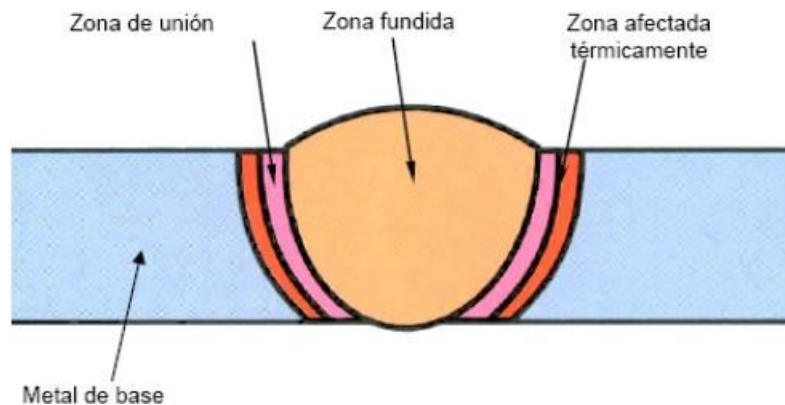


Figura 3.10: Corte mamográfico transversal de un cordón de soldadura. Fuente: Air Liquide Welding, Libro de información.

La figura 3.11 muestra los elementos más usuales en una instalación para soldadura por arco sumergido. Para recoger el fundente sobrante, se suelen utilizar además equipos de aspiración e impulsión que pueden ir reciclando el fundente para ser utilizado de forma continua. En aplicaciones de mayores exigencias de calidad, los equipos de impulsión incorporan también hornos de calentamiento para alimentar el fundente seco.

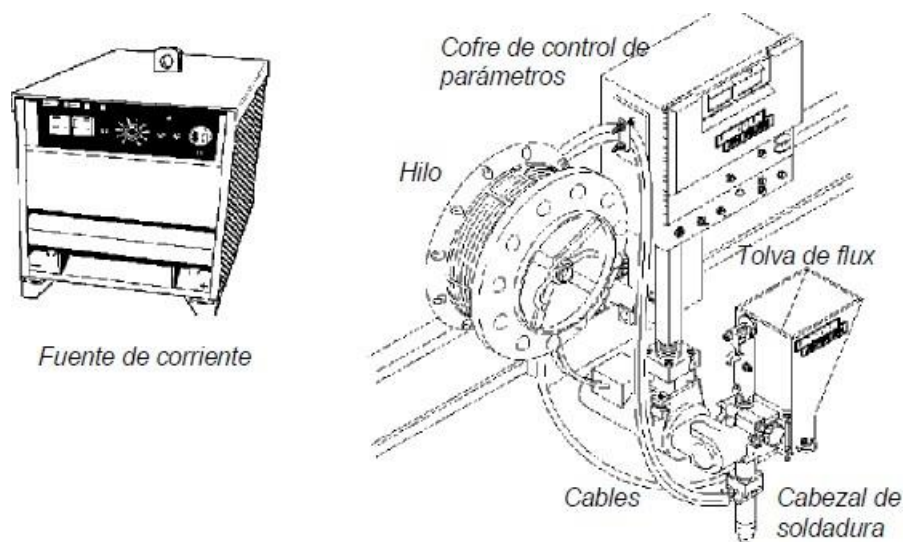


Figura 3.11: Esquema de los equipos básicos para soldadura por arco sumergido. Fuente: Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.

Capítulo 2

Análisis e ingeniería conceptual centrada en la identificación de las principales variables involucradas en este método de soldadura

1. Electrodo

Existen electrodos para soldar aceros al carbono, de baja aleación, de alto contenido en carbono, aleados, inoxidable, aleaciones de níquel. Los electrodos se suministran en forma de alambre sólido o tubular con fundente o metal en polvo en su interior, y en forma de fleje o banda. La composición del alambre debe estar de acuerdo con el metal base, pero tiene que ser empleado también con el fundente apropiado para arco sumergido.

Normalmente se presentan enrollados en carretes de 10 a 500 Kg de peso o en bidones de 100 a 1000 Kg, mientras que el fleje se suministra en bobinas. Los electrodos de acero se recubren de cobre, excepto para soldadura de materiales resistentes a la corrosión, ciertas aplicaciones nucleares o la fabricación de reactores para la industria del petróleo y petroquímica. El recubrimiento de cobre evita la corrosión, mejora el contacto eléctrico y disminuye el rozamiento del hilo con el dispositivo de alimentación.

El diámetro del hilo varía normalmente desde 1,6 a 6,4 mm.

La gama de intensidades usuales en función del diámetro del hilo se muestra en la tabla siguiente:

Diámetro [mm]	Rango de intensidades [A]
1,6	150 – 300
2	200 – 400
2,4	250 – 500
3,2	300 – 600
4	400 – 800
4,8	500 – 1000
5,6	600 – 1200
6,4	700 – 1400

Tabla 1.1: Gama de intensidades en función del diámetro del hilo. Fuente: Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.

2. Fundentes

Son compuestos minerales mezclados. Entre ellos se encuentran SiO_2 , TiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , MnO , K_2O , Na_2O , Li_2O , FeO , ZrO_2 , CaF_2 .

Durante la soldadura por arco sumergido las reacciones entre el metal líquido y el fundente son similares a las que se producen en la fabricación del acero entre el metal y la escoria: eliminación de impurezas y transferencia de elementos tales como Mn y Si.

Todos los fundentes afectan de alguna manera la composición del metal de base. Neutro, activo y aleado son términos utilizados para describir el comportamiento químico de un fundente sobre la cantidad de material, normalmente Mn y Si, que transfiere al metal depositado y ello depende de la composición del fundente, del hilo y del voltaje. Cuando la tensión se incrementa el arco se alarga, aumentando el volumen de fundente que se funde y, de esta manera, la cantidad de elementos de aleación disponibles para entrar en el baño de fusión.

Según el tipo de escoria que forman y las propiedades mecánicas que favorecen en el metal depositado se distinguen entre básicos, neutros y ácidos. Los fundentes preparados a partir de óxidos tales como SiO_2 y Al_2O_3 se llaman ácidos y se recomiendan para soldaduras en una sola pasada o en una pasada por cada lado, tanto a tope como en rincón, pues proporcionan excelentes propiedades de resistencia mecánica. Las soldaduras realizadas con este tipo de fundente tienen normalmente altas concentraciones de oxígeno. En cambio, para soldaduras que requieren varias pasadas, como lo son las que necesitan rellenar uniones de materiales gruesos (de espesores mayores a 25 mm), es recomendable usar fundentes básicos o neutros en los casos en los que se requiera que el fundente ayude a proporcionar elevadas propiedades de resistencia a impacto a bajas temperaturas.

Como ocurre con los electrodos revestidos para soldadura manual, el fabricante del fundente se reserva la composición química completa del mismo y a lo más ofrece porcentajes parciales de elementos agrupados por familias que ejercen una acción similar.

Se clasifican y dividen según su sistema de fabricación y su nivel de actividad química.

2.a. Según su sistema de fabricación

Fundentes fundidos

En los fundentes fundidos la materia prima se mezcla en seco y se funde posteriormente en un horno eléctrico a una temperatura entre 1500°C y 1700°C . Después de la fusión y de cualquier adición final, la carga del horno es colado y enfriada. El enfriamiento se produce por el paso de la mezcla fundida a través de una corriente de agua. El resultado es un producto con apariencia cristalina que es triturado, cribado para clasificación según tamaño y envasado.

Los fundentes fundidos tienen las siguientes ventajas:

- Buena homogeneidad química.
- Fácil eliminación de los finos, sin que afecte la composición del flux.
- Normalmente no higroscópicos, lo que simplifica su manejo y almacenamiento, al mismo tiempo que elimina problemas de soldadura.
- Permite el reciclado, sin cambios significativos en la composición de las partículas.
- Adecuados para las más altas velocidades de trabajo en la operación de soldadura.

La mayor limitación consiste en la dificultad de añadir desoxidante y ferroaleaciones durante su fabricación, sin segregaciones o pérdidas elevadas. La causa es la alta temperatura asociada a la fusión de las materias primas. Esto supone que no puedan usarse en ciertas aplicaciones, como en juntas estrechas o cuando los requerimientos de propiedades mecánicas son elevados. Además, no se pueden obtener en grados básicos o neutros.

Existe una limitación en la intensidad máxima de utilización a efectos de estabilidad de elementos del fundente, que aproximadamente es de 800 A.

Al no ser higroscópicos, es suficiente tratarlos a unos 200°C para eliminar la posible humedad.

Fundentes cohesionados

En la fabricación de un fundente cohesionado, las materias son pulverizadas, mezcladas en seco y cohesionadas con silicato potásico, silicato sódico o una mezcla de ambos. Esta parte de la fabricación es similar a la de la pasta de los electrodos revestidos. Después del cohesionado, la mezcla húmeda es sinterizada y cocida a una temperatura relativamente baja, Los "pellets" se rompen por machaqueo, se criban para clasificación al tamaño deseado y se envasan en sacos de PVC para protegerlos de la humedad.

Las ventajas de los fundentes cohesionados son:

- Es posible la adición de desoxidantes y elementos de aleación, gracias a la baja temperatura inherente al proceso. Los elementos de aleación pueden añadirse ya sea como ferroaleaciones o como metales elementales, para producir aleaciones que no están disponibles en el mercado como electrodos para uso manual o bien para ajustar la composición del metal depositado.
- Al ser baja la densidad de estos fundentes permiten una capa de fundente mas gruesa en la soldadura.

Las limitaciones son:

- Tendencia a absorber humedad, de la misma manera que el recubrimiento de los electrodos revestidos, lo cual da lugar en la soldadura, a la posible formación de porosidades o fisuración por hidrógeno, a causa de la absorción de humedad.
- Posible cambio en la composición del fundente, debido a la segregación o pérdida de las partículas finas.

La intensidad máxima de corriente para estos fundentes oscila entre los 800 - 1000 A.

Fundentes mezclados mecánicamente

Para producir un fundente de este tipo, el fabricante o el usuario pueden mezclar dos o más fundentes fundidos, cohesionados o aglomerados entre los comercialmente disponibles para conseguir los resultados deseados.

Los inconvenientes son:

- Segregaciones durante su envasado, almacenamiento o manipulación.
- Segregaciones en el sistema de alimentación y recuperación durante la operación de soldadura.
- Posible inconsistencia de fundente de la mezcla.

Estos fundentes están en desuso, siendo los más utilizados los fundentes aglomerados, que, por esa causa veremos en más detalle.

Fundentes aglomerados

Son el tipo de fundente más utilizado actualmente en la industria. Las materias primas son óxidos de hierro, productos químicos tales como silicatos, fluoruros, carbonatos, etc. Estas sustancias cumplen con objetivos diversos como escoriafación, viscosidad, desoxidación, ionización, etc.

El proceso de fabricación es similar al de los cohesionados, excepto que se utiliza un aglomerante cerámico en lugar de un silicato. El aglomerante cerámico requiere un secado a temperaturas relativamente elevadas.

Después de secos, se tamizan para alcanzar la granulometría adecuada. Los fundentes aglomerados se consideran cerámicos por que no han sido fundidos. Presentan una superficie muy porosa y tienden a ser higroscópicos, por lo que se recomienda que su embalaje sea estanco, además de que requieren secado antes de usarlos y el mantenimiento en ambientes secos.

Se distinguen de los fundidos porque:

- Aportan mayor cantidad de elementos al metal depositado.
- Se pueden utilizar con hilos no aleados.
- Su actividad química es muy variada.
- El consumo de fundente es menor.

Una ventaja esencial es su baja densidad aparente. La consecuencia es que en el arco se funde o escorifica poco fundente. Como resultado, el consumo es de 0.9 Kg de fundente aglomerado frente a 1.3 Kg de fundente fundido/Kg de hilo (en condiciones óptimas de recuperación y reciclado del fundente durante la soldadura).

En este tipo de fundente, la intensidad máxima de utilización suele ser mayor que en los fundidos y oscila entre 800 - 1200 A, en función de la naturaleza de los componentes. La temperatura para eliminar la posible humedad también es superior y se sitúa en torno a los 300 ° C.

2.b. Según su nivel de actividad química

Fundente neutro

No producen cambios significativos en la composición química del metal depositado incluso aunque se produzcan variaciones importante del voltaje de arco (longitud de arco que, al variar, produce la fusión de mayor o menor cantidad de fundente) durante la soldadura.

Estos fundentes son adecuados para pasadas múltiples en soldaduras de espesores de más de 25 mm. A pesar de que contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación ofrecen, sin embargo, poca resistencia a la fisuración y a la porosidad en el metal fundido, resultando una mala elección para soldadura en una sola pasada. Además, como contienen pocos desoxidantes esta acción debe reservarse al propio electrodo.

Fundentes activos

En contraste, los fundentes activos transfieren rápidamente Mn y Si y, a veces, otros elementos al metal fundido. Estos elementos mejoran la resistencia a la porosidad y a la fisuración. A medida que aumenta el voltaje se transfieren más elementos de aleación al metal depositado. Esta acción incrementa las características mecánicas, aunque puede reducir la resiliencia. Por esta razón es necesario un preciso control de la tensión en la soldadura con SAW cuando se emplean fundentes activos. Estos se recomiendan para pasadas únicas en materiales de base oxidados o sucios.

Fundentes aleados

Se llaman así aquellos fundentes activos especialmente formulados para añadir elementos de aleación al metal fundido. Se utilizan con hilo de acero al carbono para depositar un metal aleado o unir aceros de baja aleación.

Normalmente el cordón que procede de un hilo de acero al carbono con fundente aleado cuesta menos que con hilo aleado y fundente neutro. Sin embargo, hay que prestar una atención especial al reciclaje del fundente para garantizar que se mantiene la composición química del cordón.

El contenido de elementos de aleación en el metal fundido varía con la longitud de arco, que requiere cuidadoso control. Los fabricantes mediante un control de la tensión pueden ajustar el contenido de elementos de aleación en el metal depositado.

2.c. Granulometría del fundente

Cuando se emplee un fundente de granulometría muy fina es necesario prestar una atención especial al sistema de alimentación y recuperación, pues, cuando está siendo aspirado, el sistema de vacío puede separar las partículas más finas. En ese caso, solo las gruesas volverían a la alimentación

para volver a utilizarse lo que puede acarrear problemas en la composición química del metal depositado.

El consumo de fundente está muy relacionado con la cantidad de hilo necesario para rellenar la junta, y, obviamente, de que se haya recuperado el máximo del fundente no fundido, el consumo de fundente debería ser:

$$\textit{Consumo de fundente} = \textit{consumo de hilo} \cdot 1.2 \quad (2.1)$$

La tabla 2.1 muestra una amplia variedad de fundentes de aplicación industrial con sus principales especificaciones.

Tipo de fundente	Ventajas	Limitaciones	Índice de basicidad	Clase	Observaciones
Silicato de manganeso	Resistencia moderada. Admite oxidación en el metal base. Alta velocidad de soldadura. Facilidad de almacenaje.	Limitado para soldadura por multipasada y donde no se requiera tenacidad. Alto contenido de O_2 . Se reduce el C.	Ácido	Fundido	Incrementa el Mn en el metal depositado. Intensidad máxima: 1100 A. Permite mayores velocidades de soldadura
Cálcico con alto contenido de sílice	Alta corriente de soldadura. Admite oxidación en el metal base.	Mala tenacidad de la soldadura. Alto contenido en O_2 en el metal depositado.	Ácido	Aglomerado Fundido	Incremento variable de Si en el metal depositado. Apto para intensidades de hasta 2500 A. Hilos con alto Mn.
Silicato cálcico neutro	Moderada resistencia y tenacidad. Apto para todo tipo de corriente. Admite oxidación en el metal base. Apto para soldadura en una sola pasada y en multipasada.		Neutro	Aglomerado Fundido	

Tabla 2.1: Variedad de fundentes de aplicación industrial. Fuente: Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.

Tipo de fundente	Ventajas	Limitaciones	Indice de basicidad	Clase	Observaciones
Silicato cálcico con bajo contenido de sílice	Buena tenacidad con resistencia mediana. Alta velocidad de soldadura. No hay cambios en composición y el mas bajo en contenido CO ₂ .	No se admite oxidación en el metal base. No utilizable para soldadura con electrodos múltiples.	Básico	Aglomerado Fundido	
Aluminato básico	Buena resistencia y tenacidad en pasadas múltiples. No modifica el C, pero hay pérdidas de S y Si.	No admite oxidación en el metal base. Limitado a soldadura con D.C y polaridad positiva. Mal desprendimiento de la escoria.	Básico		Normalmente incrementa el Mn en el metal depositado. Intensidad máxima 1200 A. Buenas propiedades mecánicas.
Alúmina	No hay cambio de composición de la soldadura e introduce menos O ₂ que los ácidos. Permite una velocidad de soldadura moderada a rapida.		Neutro	Aglomerado Fundido	
Fluoruro básico	Muy bajo O ₂ . De moderada a buena tenacidad a baja temperatura.	Puede presentar problemas de desprendimiento de escoria y de absorción de humedad.	Básico	Aglomerado Fundido	Puede usarse con todos los hilos. Preferible para soldadura con D.C. Muy Buenas propiedades de la soldadura.

Tabla 2.2: Variedad de fundentes de aplicación industrial, continuación. Fuente: Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.

2.d. Normas y tipos de fundentes y electrodos

Los fundentes y las combinaciones de fundente/alambre para SAW, están estandarizados y categorizados en varios estándares internacionales, principalmente EN ISO y AWS. Normas a las que se hace referencia en este trabajo.

EN ISO

- EN ISO 14171: Electrodos de alambre sólido, electrodos con núcleo tubular y combinaciones de alambre/fundente para SAW de aceros sin aleación y de grano fino.
- EN ISO 14174: Fundentes para SAW.
- EN ISO 24598: Electrodos de alambre sólido, electrodos con núcleo tubular y combinaciones de alambre/fundente para SAW de aceros resistentes a la fluencia.
- EN ISO 26304: Electrodos de alambre sólido, electrodos con núcleo tubular y combinaciones de alambre/fundente para SAW de aceros de alta resistencia.

AWS

- AWS 5.17: Especificación para electrodos y fundentes de acero al carbono para SAW.
- AWS 5.23: Especificación para electrodos y fundentes de acero de baja aleación para SAW.

3. Influencia de los parámetros de soldadura en las características y propiedades del metal depositado

Vamos a estudiar los diferentes parámetros cuya variación va a afectar directamente a la naturaleza, características y comportamiento de los depósitos de soldadura por arco sumergido.

El proceso SAW puede utilizar corriente alterna o continua, y la fuente puede estar regulada con una curva de característica estática de corriente constante o de voltaje constante. La elección más común, o para las aplicaciones más usuales es trabajar con una fuente de corriente regulada en voltaje constante y con el electrodo consumible en la polaridad positiva. La clase de corriente y polaridad influyen en la composición química del metal aportado y en la forma del cordón.

El factor de aporte es mayor conectando el hilo al polo negativo, pero la penetración es menor. Este efecto se utiliza fundamentalmente en la soldadura de recargue, para evitar una excesiva penetración en el metal de base, que en la mayoría de las ocasiones no es deseable por razones metalúrgicas.

Cuando se suelda un acero cuya soldabilidad es crítica, la fisuración es menos probable si el hilo se conecta al polo negativo, porque la dilución del material de base en el aportado es menor. Esto puede suceder en soldaduras de metales con alto contenido de impurezas, en donde interesa que la dilución entre el electrodo consumible con el metal base sea mínima para obtener mejores propiedades mecánicas en el cordón e incluso, evitar porosidad en el mismo. Otra aplicación en la que se puede optar por soldar en polaridad negativa es cuando existe riesgo de perforación de las chapas, sobre todo en la primera pasada, en espesores finos o con algunas separaciones no deseadas en las juntas a unir. También se suele emplear la polaridad negativa si se desea obtener

una elevada “garganta” o “cuello” del cordón en soldadura en rincón en una sola pasada. Esto no es una práctica muy recomendable, salvo que la resistencia mecánica de dicho cordón no tenga una importancia significativa, ya que, aunque en apariencia pueda parecer que el cordón, al resultar más amplio pueda tener mayor resistencia, suele suceder lo contrario, es decir, que la penetración de dicho cordón es pobre, la dilución con el metal base también, y, por tanto, la resistencia de la unión resulta menor que un cordón de menor “garganta” o “cuello” que estuviera más penetrado en la junta.

Podríamos dividir los diferentes parámetros que varían el resultado de una soldadura con el proceso de arco sumergido de la siguiente forma:

3.a. Parámetros principales

La variación en pequeña proporción de uno de estos parámetros afecta significativamente el resultado de la soldadura.

Intensidad de corriente de soldadura

La intensidad de corriente determina, en primer lugar, el factor de aportación y caracteriza la forma exterior del cordón. Si el resto de parámetros se mantienen constante, un aumento de la intensidad de soldadura no resulta en una mayor anchura del cordón, si no en una mayor cantidad de material aportado. También actúan sobre la forma interior influyendo en la penetración y en una serie de más características que se listan a continuación en función del aumento o disminución de la intensidad.

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de un aumento de la intensidad de corriente, manteniendo constante el resto de los parámetros.
 - Se aumenta la penetración.
 - aumenta la densidad de corriente.
 - Aumenta la velocidad de alimentación del hilo.
 - Aumenta la tasa de deposición
 - Entrada de calor superior.
 - Zona afectada térmicamente se amplía.
 - Mayor altura de cordón
 - Mayor dilución en el metal base.
- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de un aumento excesivo de la intensidad de corriente.
 - Se produce un arco errático.
 - Se producen mordeduras, especialmente en soldaduras en ángulo en posición cornisa, ya que el baño de soldadura cae por efecto de la gravedad, arrastrando parte del metal base de la pared vertical que también ha sido fundido por efecto del arco.
 - El cordón se hace muy estrecho y alto.

La figura siguiente muestra el efecto de la variación de la intensidad, considerando que el resto de parámetros se mantienen constante, según:

$$A_1 < A_2 < A_3$$

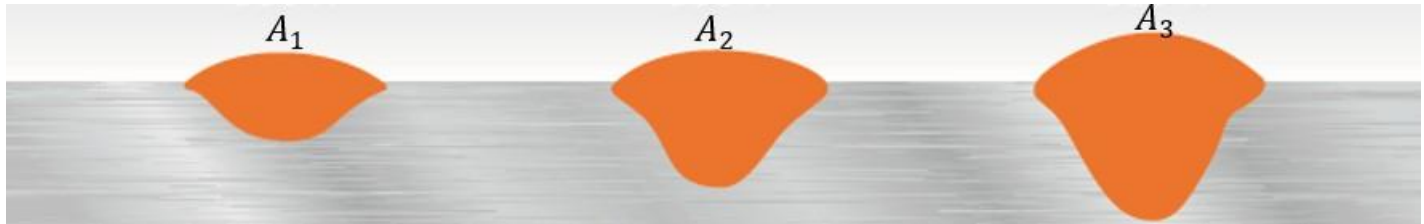


Figura 3.1: Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones en la intensidad de corriente.
Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

La intensidad de soldadura está directamente relacionada con la velocidad de alimentación de hilo (Wire Feed Speed o WFS). A mayor WFS la fuente de corriente proporciona una mayor corriente para fundirlo, sobre todo en el caso de trabajar en modo de voltaje constante. De hecho, en algunos equipos no se regula directamente la corriente de soldadura, sino la WFS, ya que es más preciso su control mediante un tacómetro, obteniendo una lectura de la intensidad resultante mientras se está realizando la soldadura.

Tensión o voltaje

Al aumentar la tensión del arco aumenta la cantidad de escoria fundida incrementándose el contenido de Mn y de Si en el metal aportado.

Variando la tensión se modifica la longitud del arco. Esto influye especialmente sobre el ancho y la altura del cordón.

Deben considerarse las pérdidas de voltaje desde la fuente de corriente por efecto Ohm. Para evitarlas, así como el calentamiento excesivo de los elementos de conducción de la corriente eléctrica hasta el arco, es necesario respetar las secciones de cables recomendadas para la longitud de conducción que se necesite, así como asegurarse que los elementos de unión de los diferentes componentes eléctricos y cables se realizan con los materiales adecuados y se conservan en perfecto estado. De no hacerse de esta forma, controlar el voltaje real que se registra en el arco, que puede ser muy diferente al que se visualiza en la fuente de corriente, será muy difícil.

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de un aumento del nivel de voltaje, manteniendo constante el resto de los parámetros.
 - Entrada de calor superior.
 - Zona afectada térmicamente se amplía.
 - No hay cambio en la penetración
 - Cordones más anchos, altura de cordones más baja.
 - Mayor consumo de fundente

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de un aumento excesivo del nivel de voltaje.
 - Se producen mordeduras.
 - Aumenta la tendencia a soplo magnético: al aumentar la velocidad de soldadura debe mantenerse el voltaje tan bajo como se pueda.
 - Debe vigilarse especialmente cuando se usa un fundente activo, ya que se podría sobrealear son Si, Mn u otros componentes del fundente.

La figura siguiente muestra el efecto de la variación del nivel de voltaje, considerando que el resto de parámetros se mantienen constante, según:

$$V_1 < V_2 < V_3$$

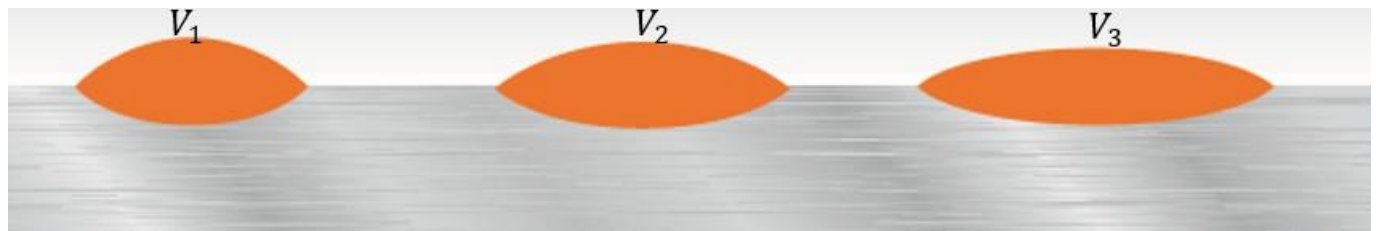


Figura 3.2: Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones en el nivel de voltaje. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

La intensidad de soldadura y el voltaje guardan relación. Cuando se suelda a elevadas intensidades, la velocidad de alimentación de hilo es elevada. Si el voltaje es demasiado pequeño, el hilo choca contra el baño de fusión antes de poder fundirse en el arco. Esto provoca inestabilidad del arco ya que, si se trabaja en el modo de voltaje constante, la fuente de corriente intentara compensar de forma brusca el bajo voltaje que se produce en esa situación.

Diámetro de hilo

El diámetro de hilo tiene influencia en la densidad de corriente y también en los límites de corriente que pueden emplearse para fundir el hilo de forma estable.

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de un aumento en el diámetro del hilo, manteniendo constante el resto de los parámetros.
 - Se produce menor penetración a una corriente dada.
 - El arco se puede desestabilizar.
 - Posibilidad de aumento en la tasa de deposición.
 - Cordón más ancho.
 - Es más difícil establecer el arco.
 - Hay menor riesgo de perforar las chapas cuando se usa corriente elevada si hay separaciones entre las mismas.

- Se hace aceptable usar niveles de corriente más elevadas.

La figura siguiente muestra el efecto de la variación del diámetro del hilo, considerando que el resto de parámetros se mantienen constante, según:

$$\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$$

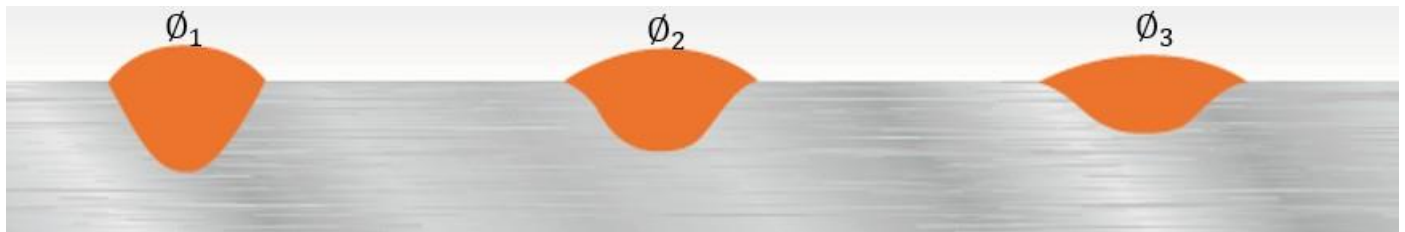


Figura 3.3: Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones en el diámetro del hilo. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

Velocidad de soldadura o avance (Travel Speed o TS)

La velocidad de avance determina cuanto tiempo el arco queda retenido por unidad de longitud. Esto produce un efecto sobre prácticamente todos los parámetros de soldadura que se apliquen en el arco y como este afecta al metal sobre el que dicho arco está establecido.

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de un aumento de la TS, manteniendo constante el resto de los parámetros.
 - Entrada de calor más baja.
 - La penetración disminuye.
 - El tamaño del cordón se hace más pequeño.
 - Menor dilución.
 - Aumenta la tendencia a mordeduras, sensibilidad a soplo magnético, porosidad, forma irregular del cordón.

La causa de menor penetración con menor velocidad parece ser que se debe al gran baño de metal fundido que se forma bajo el arco y que actúa como almohada, reduciendo la penetración. Cuando la velocidad de soldeo es demasiado grande la penetración disminuye porque como el calor es insuficiente, el arco no puede actuar el tiempo suficiente para llegar a penetrar.

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de un aumento excesivo de la TS.
 - Se produce una forma de cordón en “sombrero” que es susceptible a fisuraciones.
 - Se puede producir perforación del arco.
 - El baño de tamaño excesivo puede resultar rugoso, con salpicaduras e inclusiones de escoria.

- La penetración es mayor.

La figura siguiente muestra el efecto de la variación de la TS, considerando que el resto de parámetros se mantienen constante, según:

$$v_1 < v_2 < v_3$$

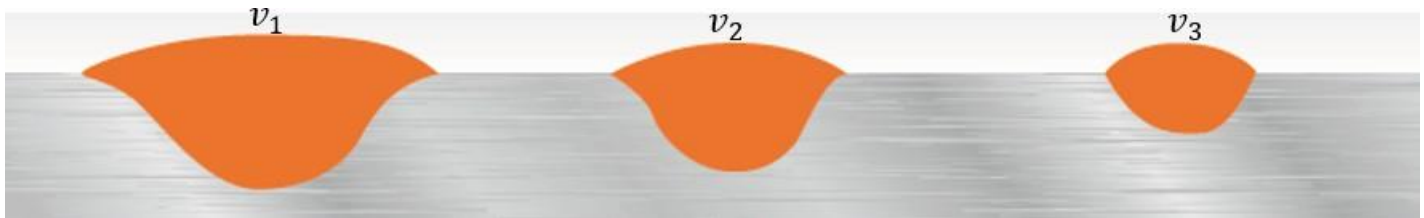


Figura 3.4: Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones en la TS.

Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

Polaridad de corriente

La polaridad también tiene un efecto en el tipo de cordón de soldadura que resulte, normalmente se expresa en conjunto con el modo de corriente utilizado de soldadura:

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de una configuración del tipo: electrodo en polaridad positiva con una fuente en un modo de corriente continua (DC+).
 - La penetración es mayor.
 - Hay mayor resistencia a porosidad.
 - La soldadura resulta con un aspecto más suave.
 - Arco estable.
 - Hay mayor dilución.
 - Tasa de deposición más baja.
 - Bajas velocidades de desplazamiento.

Es la forma más usual de trabajar con arco sumergido, es aplicable a todas las circunstancias y además permite altas velocidades.

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de una configuración del tipo: electrodo con un modo de corriente alterna (AC).
 - la variación de polaridad positiva a negativa se da en cada ciclo de forma sinusoidal.
 - Difícil inicio del arco.
 - Inexistencia de soplo magnético.
 - Penetración más baja.

- Menor dilución.
 - Tasas de deposición más altas que DC+.
 - Velocidad de desplazamiento mayor que en DC+
- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de una configuración del tipo: electrodo en polaridad negativa con una fuente en un modo de corriente continua (DC-).
- Tasas de deposición más alta que CA.
 - Mínima penetración.
 - Arco inestable.
 - Mínima dilución.
 - Se usa principalmente para revestimiento.
 - Máxima velocidad de desplazamiento.

Los equipos modernos, con tecnología inverter de alta frecuencia permiten adaptar cada una de las ventajas del tipo de corriente ya que integran la posibilidad de soldar en los dos modos de soldadura y en todas las posibles combinaciones de polaridad.

Estos permiten adaptar el tipo de corriente a las necesidades particulares de cada aplicación. Hoy, es posible combinar los efectos óptimos de cada polaridad y tipo de corriente para proporcionar la tasa de deposición, la penetración en el metal de base y/o el aporte térmico que requiera un material especial.

La figura siguiente muestra el efecto conjunto de la variación de la polaridad y el modo de soldadura, considerando que el resto de parámetros se mantienen constante:

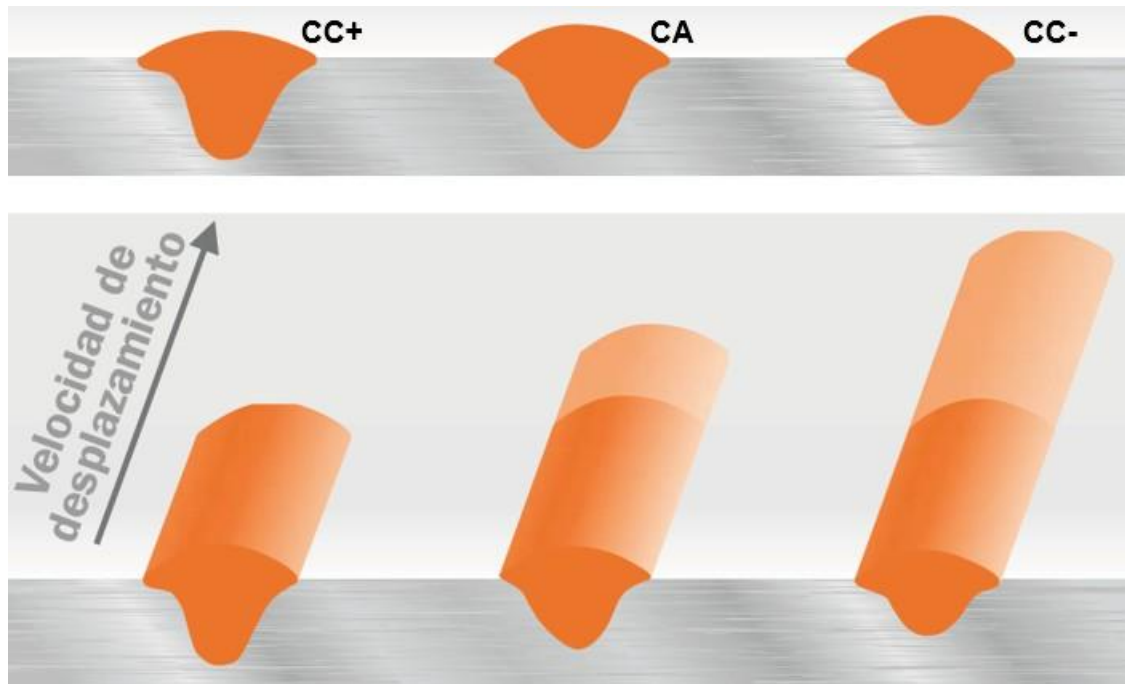


Figura 3.5: Efectos en el cordón de soldadura debido a variaciones, en conjunto, del modo de soldadura y la polaridad de conexión. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

3.b. Parámetros secundarios

La variación de estos parámetros producirá efectos en el resultado de la soldadura que pueden usarse para optimizar el proceso.

Regulación de la fuente

- Voltaje Constante o Corriente Variable. A una variación de corriente de soldadura corresponde una pequeña variación del voltaje de arco. La longitud de arco tiende a mantenerse en cualquier circunstancia. Lo que proporciona cordones homogéneos, ya que al mantenerse constante la longitud del arco se logra deposiciones constantes. Con este tipo de regulación se usa alambres de mayor diámetro, a partir de 2,4 mm. Todas las fuentes de corriente del mercado actúan en este modo.
- Corriente Constante o Voltaje Variable. A una variación de voltaje del arco corresponde una pequeña variación de la corriente de soldadura. La intensidad tiende a mantenerse estable en cualquier circunstancia y, con ella la penetración del metal base, siendo posible aumentar la velocidad de avance del hilo, es decir, se logran cordones no homogéneos, pero se disminuye el tiempo de soldadura. Se presenta como un modo de soldadura útil según las exigencias finales del cordón de soldadura.

3.c. Altura del fundente

La altura del fundente debe ser la justa necesaria para cubrir la luz del arco.

- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de una precaria altura de fundente.
 - Se producen destellos.
 - Pueden producirse poros.
 - Puede tropezar la boquilla con la escoria fundida.
- Consecuencias, en el cordón de soldadura, de una altura excesiva de fundente.
 - Se puede ahogar el arco.
 - El cordón puede resultar muy estrecho.

3.d. Stick-out

La distancia del hilo desde la boquilla de corriente hasta la superficie del metal base es conocida como Stick-Out Eléctrico o ESO. El ESO debe definirse en función de la intensidad, el diámetro del hilo, la velocidad de soldadura y el tamaño del baño fundido. Cuando se aumenta el ESO, si el resto de parámetros se mantienen constante, aumenta la tasa de deposición, ya que aumenta la resistencia eléctrica del hilo, que depende de la longitud del electrodo según:

$$R = \rho \cdot \left(\frac{l}{S} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

R = resistencia eléctrica del hilo.

ρ = Resistividad del hilo.

l = ESO.

S = Área transversal del hilo.

Pero, además debe tenerse en cuenta que, si se aumenta el ESO debe aumentarse el voltaje de arco para compensar la pérdida que del mismo se produce en el hilo.

$$O V = R \cdot I \quad (3.2)$$

Este efecto del aumento de la tasa de deposición en función del ESO se utiliza en una técnica especial, denominada “Long ESO”, en la que, simplemente añadiendo en la antorcha un dispositivo que permite aumentar el ESO, se aumenta la cantidad de material depositada, a los mismos parámetros de soldadura (aumentando simplemente el voltaje para compensar la pérdida del mismo que se produce a mayores ESO)

3.e. Posición e inclinación del electrodo o arco de soldadura

La soldadura de arco sumergido se caracteriza por un baño normalmente grande con un enfriamiento muy lento debido a la gruesa capa de escoria que lo protege. Esto resulta en que el efecto de la gravedad, así como posibles adelantamientos de escoria en las soldaduras sean factores que deban controlarse mediante el correcto control de los parámetros anteriores, además de la posición de ataque del arco sobre dicho baño, que normalmente se controla con el correcto posicionamiento de la torcha.

En la Figura 3.6 se muestran los tres tipos de posicionamiento de la torcha para desarrollar una unión soldada.

- Arrastre: Produce penetración profunda, riesgos de fracturación por calor altos y máximo refuerzo de la costura.
- Neutra: Produce penetración moderada, riesgos de fracturación por calor bajos y un refuerzo de la costura moderado.
- Empuje: Produce penetración superficial, riesgos de fracturación por calor bajos y un refuerzo de la costura mínimo.

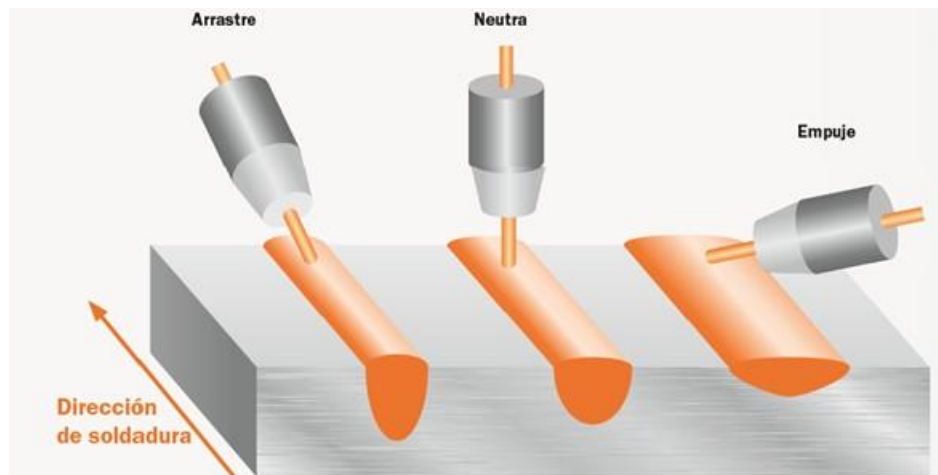


Figura 3.6: Efectos del ángulo del electrodo en soldaduras a tope. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

3.f. Posición de la masa

La pinza de masa cierra el circuito eléctrico que establece el arco entre el electrodo y el metal base. Normalmente las intensidades de soldadura que se utilizan en soldadura con el proceso de arco sumergido son muy superiores a las que se utilizan en otros procesos tradicionales de soldadura al arco. A mayor corriente de soldadura, el campo magnético que se genera en el electrodo es de mayor consideración. Así mismo, la corriente inducida en la pieza que se suelda es también un factor resultante de este fenómeno y de especial consideración en la soldadura de metales magnetizables. La posición de la masa determina el sentido de circulación de la corriente y también la dimensión de la corriente inducida en la pieza que se suelda. En los casos en que se pueda utilizar corriente

alterna, este efecto queda minimizado, pero en soldadura con corriente continua, la posición de la masa supondrá mayor o menor magnetismo en las piezas soldadas e incluso defectos asociados a los que se conoce como soplo magnético.

3.g. Aporte térmico

En el depósito de un cordón, la masa de metal aportado es pequeña en relación a la del metal de base frío. Por eso, en condiciones normales se enfría rápidamente, dando lugar a diferentes estructuras metalúrgicas, en función de la velocidad de enfriamiento.

Si el enfriamiento es rápido influye sobre las características mecánicas del metal aportado, aumentando su carga de rotura y disminuyendo el alargamiento y tenacidad.

Para aminorar el endurecimiento del depósito debe dejarse la escoria cubriendo el cordón hasta que la temperatura descienda por debajo de la transformación martensítica.

El grano grueso que se forma al depositar un solo cordón, se afina en el caso de varias pasadas y aunque con ello disminuye la carga de rotura del depósito, aumenta al mismo tiempo que la tenacidad y el alargamiento del metal aportado.

Con el proceso de soldadura por arco sumergido, pueden conseguirse cordones muy gruesos. Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, resistencia a la fisuración, dureza de las zonas afectadas térmicamente y deformación de los materiales que se sueldan, es recomendable, y en este proceso con más motivo que en otros de soldadura de arco, vigilar que los cordones no resulten excesivos. Una forma adecuada es cuidando que el Aporte térmico no supere el límite que se imponga según la aplicación, el material base y las propiedades que se deseen obtener. En ningún caso se recomienda que dicho Aporte Térmico supere los 3 KJ/mm. Recordemos que el Aporte Térmico o “Heat Input” viene definido por los parámetros de soldadura, según la siguiente formula:

$$A.T = \frac{I \cdot V \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (3.3)$$

Donde:

A.T = Aporte Térmico.

I = Intensidad de corriente [A].

V = Voltaje del arco [V].

v = Velocidad de soldadura [mm/min].

Debe considerarse que, en algunas técnicas de arco sumergido, como en soldadura de recargue, donde se suele usar el electrodo consumible en polaridad negativa para obtener menor penetración ya que el aporte térmico esta menos desplazado hacia la superficie del material que se suelda, o en soldaduras con alambres múltiples, pueden resultar mayores valores de Aporte Térmico teóricos, que, en la realidad no afectan negativamente al resultado de la soldadura. En dichos casos, se deben considerar estimaciones especiales del mencionado Aporte Térmico.

Capítulo 3

Equipos, accesorios, requerimientos de capacitación, ensayos y costos

1. Equipos de Base

- Fuente de energía:

Es una fuente de poder especialmente diseñada para este proceso. Se emplea tanto con corriente continua como con corriente alterna. Para cualquiera de los casos, la fuente de poder debería tener un ciclo de trabajo del 100 %, porque las operaciones por arco sumergido son continuas y el tiempo normal de operación excede de 10 minutos, periodo base para cumplir el ciclo de servicio. Para la soldadura por arco sumergido con corriente continua puede emplearse una fuente de poder de tipo de voltaje constante, que es más común para alambres de pequeño diámetro, mientras que el tipo de corriente constante es mayormente usado para alambres de diámetros mayores. En cualquiera de los casos, el alimentador de alambre debe estar adecuado para el tipo de la fuente de poder que se emplea.

- Control de soldadura automático:

Los controladores de soldadura digital automáticos ofrecen confiabilidad, flexibilidad y rendimiento gracias a su capacidad de interactuar con las fuentes de poder. En su memoria se pueden cargar hasta 15 programas diferentes de soldadura para diferentes aplicaciones pre establecidas por las necesidades de la industria en cuestión, además, poseen la capacidad para cambiar de programa durante una misma operación de soldadura

2. Equipos complementarios

- Cabezal de alimentación de automatización rígida:

Estos cabezales son diseñados específicamente para aplicaciones de automatización rígida, es decir, en aplicaciones donde lo que se desplaza es la pieza a soldar y no el equipo. Permite movimientos de traslación y rotación en los tres ejes.

- **Tractor:**

Los tractores modulares autopropulsados, son utilizados junto con la fuente de poder para soldaduras de plataformas extensas como uniones a tope y uniones de filete en placas largas, plataformas de puentes o barcasas, fabricaciones de grandes tanques o construcción naval.

A diferencia del equipos rígido en este caso lo que se desplaza es la componente que suelda y no la pieza.

- **Antorcha o tobera de alimentación:**

Existe una amplia gama de antorchas cuya elección va a depender del diámetro de alambre a soldar, cantidad de fundente necesario para el proceso, tipo de caudal de fundente (concéntrico con la alimentación de alambre o excéntrico), configuración de salida de alambre (una o dos hebras), intensidad de la corriente de trabajo, geométrica de la pieza a soldar.

- **Desenrollador de alambre:**

Para la correcta alimentación del alambre al sistema de arco sumergido se requiere de un dispositivo en lo que se monte los rollos de alambre y, lo facilite según la necesidad del proceso.

- **Enderezador de alambre:**

Los hay para un solo alambre o para dos alambres según el tipo de proceso que se requiera implementar.

- **Tolva de fundente:**

Para llegar finalmente con el fundente desde el horno de almacenamiento hasta la zona de soldadura es necesario una tolva que se conecte con la antorcha y logre la deposición correcta para el proceso.

- **Horno:**

Además del equipo de soldadura, deben considerarse el equipo de almacenamiento de fundente para su posterior alimentación a la torcha de forma constante y en perfectas condiciones de secado y limpieza. Estos equipos permiten un gran ahorro en el consumo además de contribuir a la calidad resultante de la soldadura como consecuencia directa de su uso.

3. Ensayos

Los ensayos más comunes para verificar la calidad del material aportado en un proceso de soldadura en la industria manufacturera son los caracterizados como no destructivos, entre los más usados tenemos; partículas magnéticas, ultrasonido, tintas penetrantes y radiografías. La utilización de uno u otro, depende de las exigencias de calidad establecidas para el producto fabricado.

3.a. Partículas magnéticas

El ensayo con partículas magnéticas consta de tres fases: magnetización de la zona a observar, repartición de las partículas magnéticas y la observación de las indicaciones.

Consiste en someter a la pieza a inspeccionar a una magnetización adecuada y espolvorear sobre la misma finas partículas de material ferromagnético. Así es posible detectar discontinuidades superficiales en materiales ferromagnéticos. Las indicaciones se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta.

La magnetización de las piezas a examinar se puede realizar de dos formas diferentes como son: magnetización por imanes (utilizando potentes imanes o electroimanes), o por corriente eléctrica (puede ser por corriente eléctrica circular o longitudinal). La aplicación de las partículas magnéticas puede aplicarse por vía seca (en forma de polvo) o por vía húmeda (con medios acuosos o por disolventes sintéticos).

Es un método simple, portátil y rápido, solo puede ser utilizado en materiales ferromagnéticos de cualquier tipo y para detección de discontinuidades superficiales.

3.b. Ultrasonido

El equipo utilizado para la aplicación de estas técnicas es capaz de generar, emitir y captar haces de ondas muy bien definidas sujetas a las leyes de reflexión al encontrar en su trayectoria un cambio en las propiedades físicas del medio en el cual se propagan. Al ser captadas, son analizadas según el objetivo del equipamiento y con la determinación del tiempo transcurrido desde su emisión hasta su recepción, puede conocerse la distancia recorrida, al ser la velocidad previamente establecida.

Es un método en el cual un haz sónico de alta frecuencia (125 KHz a 20 MHz) es circulado en el material a ser inspeccionado con el objetivo de detectar discontinuidades internas y superficiales (fisuras, inclusiones, etc.). El sonido que recorre el material es reflejado por las interfaces y es detectado y analizado para determinar la presencia y localización de discontinuidades.

Es un método de alta precisión, transportable, de alta sensibilidad, rápido y que entrega resultados inmediatos. Con él se pueden detectar discontinuidades superficiales y sub superficiales.

3.c. Tintas penetrantes

Los ensayos con líquidos penetrantes consisten en la aplicación de un líquido sobre la superficie del cuerpo a examinar, que penetra por capilaridad en las imperfecciones de la soldadura. Una vez limpiado el exceso, nos revelará el que ha quedado retenido en la imperfección (poros, fisuras, etc.). Su aplicación consta de las siguientes fases:

- Limpieza inicial de la pieza.
- Aplicación del líquido penetrante.
- Medida del tiempo de penetración.
- Eliminación del líquido sobrante.
- Aplicación del líquido revelador.
- Examen de la pieza.
- Limpieza final de la pieza

Es simple de usar preciso y fácil, pero solo capaz de detectar grietas superficiales.

3.d. Radiografía

La inspección por radiografía (rayos X), es un método de inspección no destructiva que consiste en la absorción diferenciada de radiación penetrante por la pieza que está siendo inspeccionada. Esa variación en la cantidad de radiación absorbida, detectada mediante un medio, nos indicará, entre otras cosas, la existencia de una falla interna o defecto en el material. La radiografía industrial es entonces usada para detectar variaciones de una región de un determinado material que presenta una diferencia en espesor o densidad comparada con una región vecina (es un método capaz de detectar con buena sensibilidad defectos volumétricos). Los defectos de los materiales como grietas, bolsas, inclusiones, etc. de distintas densidades, absorben las radiaciones en distinta proporción que el material base, de forma que estas diferencias generan detalles de contraste claro-oscuro en la placa fotográfica colocada detrás de la pieza. Esto es lo que permite identificar defectos en la inspección de una soldadura por radiografía.

Para facilitar la labor se usan colecciones de radiografías patrón, en las cuales los defectos están claramente identificados para unas condiciones dadas de tipo de material y tipo de soldadura.

Es muy sensible y proporciona una impresión en película, con él, se puede detectar cualquier discontinuidad con alta precisión.

4. Requerimientos de calificación

En cuanto a los requerimientos de capacitación para operar estos equipos, dado que mayormente se suelda en posición de ranura plana o filete horizontal, basta con que el soldador califique para soldar en posiciones 1F, 2F y 1G. Ahora bien, en ocasiones especiales con ayuda del fundente se puede llegar a soldar en posiciones que requieran una calificación 2G.

Como se puede ver la calificación del soldador para la utilización de estos equipos no es en absoluto un requisito exigente, ya que, 2G se presenta como un nivel básico en cuanto a habilidades de soldadura.

Una vez acreditada la habilidad del soldador para realizar este proceso, este, debe adquirir las habilidades necesarias para calificar en cuanto al dominio de los equipos a utilizar. Quedando completamente calificado para soldar a través del proceso de arco sumergido.

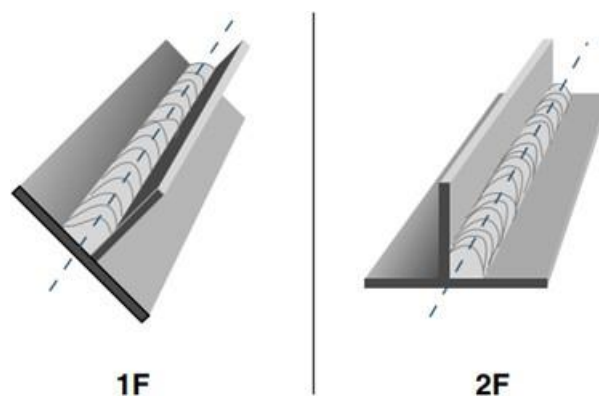


Figura 4.1: Uniones de filete. Fuente: Manual de sistemas y materiales de soldadura, INDURA.

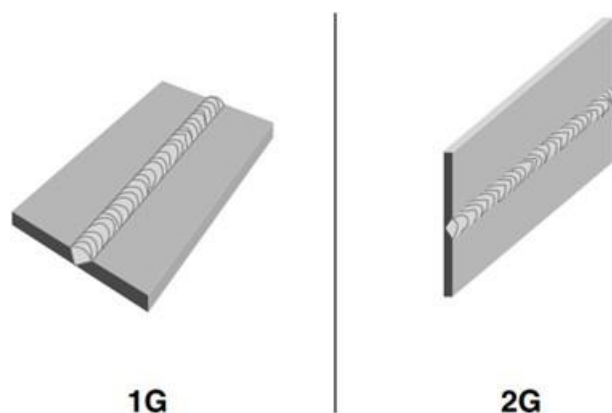


Figura 4.2: Uniones Biseladas. Fuente: Manual de sistemas y materiales de soldadura, INDURA.

5. Costos

Los costos asociados a la instalación de este tipo de tecnología van ligados al tipo de configuración que se quiera implementar, y el uso que se le quiera dar.

La configuración más común, que es utilizada para la soldadura de largos rieles, placas o perfiles y tuberías se compone de una fuente de poder y un tractor, componente auto propulsado que recorre la zona de unión soldando a medida que avanza.



Figura 5.1: Equipo mecanizado de soldadura por arco sumergido. Fuente: SOLDADURASSOLTEC SPA.

5.a. Especificaciones de la fuente de poder

- Voltaje de entrada: $3\phi\ 380V \pm 20\%$ (50Hz – 60Hz)
- Corriente de entrada nominal I_1 : 80 A
- Potencia de entrada nominal P_1 : 52 kW
- Voltaje de circuito abierto U_{20} : 71 V
- Corriente primaria sin carga I_{10} : 0.3 A
- Potencia sin carga P_{10} : 200 W
- Rango de voltaje ajustable U_2 : 20 V – 50 V
- Rango de corriente ajustable I_2 : 100 A – 1000 A
- Ciclo de trabajo: 1000A/44V×100 %
- Eficiencia η : ≥ 0.85 , rated conditions 1000A/44V, 380V
- Factor de potencia λ : 0.7 – 0.9
- Grado de protección: IP21
- Tipo de refrigeración: Fan cooling
- Dimensiones: 810×345×1022
- Peso: 110 Kg

5.b. Especificaciones del tractor

- Voltaje de entrada nominal: 110 V DC
- Diámetro alambre de soldadura: 2,8-5 mm
- Velocidad de alimentación alambre: 0.5 - 2.5 (m/min)
- Velocidad de soldadura: 20 - 72 (m/h)
- Ajuste de movimiento horizontal de columna central: ± 30 (mm)
- Inclinación cabezal: $\pm 45^\circ$.
- Peso de fundente contenido: 10 (L)
- Peso: 50 (kg)

Este tipo de configuración tiene un costo de 6.866.667 CLP. Precio que incluye tanto la fuente de poder como el tractor.

Los amplios rangos de voltaje y corriente de salida de este tipo de fuentes de poder, además, las hace útiles para ser usadas en procesos de corte por torche

Capítulo 4

Aplicaciones industriales. Problemas y oportunidades

La soldadura por arco sumergido pasa a ser económicamente rentable a partir de un espesor de chapa de 6 mm. Los variados casos de aplicación en los que se utiliza la soldadura por arco sumergido van desde uniones a tope o de filete en placas largas, plataforma de puentes y barcas, recipientes de presión, líneas de panel, fabricación de tuberías, grandes tanques o construcción naval, vástagos y carcasas de cilindros. El procedimiento se aplica tanto para la soldadura de uniones como para el recargue de capas de protección anti desgaste y anticorrosiva. Pueden soldarse aceros no aleados y aleados, así como aceros al cromo níquel.



Figura 0.1: Soldadura a tope en placa larga. Fuente: Material propio



Figura 0.2: Soldadura circunferencial de tuberías. Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición



Figura 0.3: Soldadura de estanques. Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

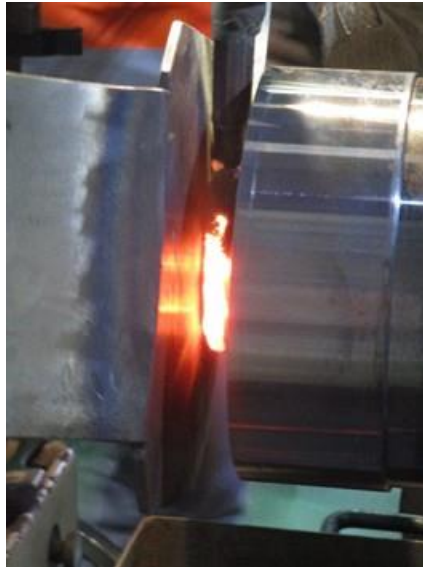


Figura 0.4: Soldadura de vástagos. Fuente: Material propio.

Los procedimientos de soldadura de alto rendimiento como la soldadura por arco sumergido se aplican, sobre todo, mecanizados o automatizados. Unos tiempos de soldadura inferiores en combinación con un tiempo de funcionamiento superior provocan que sea posible soldar cordones largos sin interrupción. De éste se derivan unos tiempos secundarios inferiores con el efecto positivo de tener unos costes de soldadura más reducidos.

Tanto la calidad como el aspecto que se obtiene de estas uniones con este proceso suele ser excelente.

Las características ventajosas del proceso por arco sumergido son:

- Los bordes pueden biselarse con una abertura estrecha, lo que presenta menor cantidad de metal aportado. En algunas aplicaciones, incluso, no es necesaria la preparación de bordes.
- El arco actúa bajo la capa de fundente, evitando salpicaduras, emisión de radiación UV, y, además los gases emitidos son muy inferiores a los que se producen con otros procesos de soldadura, por lo que se requiere mucho menos material de protección del operario.
- Pueden ajustarse perfectamente los parámetros de soldadura.
- Velocidades de desplazamiento muy altas de hasta 250 cm/min (100"/min).
- El fundente actúa como un enérgico desoxidante para eliminar contaminantes del baño fundido y producir soldaduras sanas con buenas propiedades mecánicas. El fundente puede aportar, si se desea, elementos de aleación a la soldadura.
- El proceso SAW puede utilizarse en zonas expuestas a viento. El fundente granular ejerce una protección superior en estos casos, a la obtenida por el recubrimiento del electrodo en el proceso SMAW o al gas en el proceso GMAW.
- La penetración que se obtiene es superior a la que proporcionan otros procesos, por lo que no suelen requerirse tamaños de cordones tan altos, ya que se obtiene similares propiedades mecánicas a las que proporcionan otros procesos con mayores tamaños de cordón.

- El aspecto de las soldaduras resulta suave, limpio y, si se ha ejecutado bien, la escoria se elimina sola por lo que se puede pintar o dar el tratamiento superficial que se requiera directamente tras soldar.
- Suele usarse en procesos automáticos, por lo que es menos dependientes de los errores humanos.
- Tasas de deposición superiores de hasta 100 kg/h (220 lbs/h) en soldadura de múltiples alambres.
- Utilizable en espesor de placa desde 6 mm a un espesor ilimitado.
- Excelentes propiedades mecánicas y soldaduras de calidad rayos X.

Las limitaciones son:

- Solo adecuado para posiciones de ranura plana (1G) y en filete horizontal (PA/1F, PB/2F). PC/2G posible con ayuda del fundente
- Requiere la configuración de parámetros y el posicionamiento preciso del electrodo.
- Es necesario un dispositivo para el almacenamiento, alimentación y recogida del fundente.
- El fundente está sujeto a contaminaciones, que suelen producir discontinuidades en la soldadura.
- Al utilizarse normalmente en instalaciones automáticas, se requiere una inversión en equipos que debe tenerse en cuenta.

El proceso se emplea para soldar aceros al carbono, aceros de baja aleación y alta resistencia, aceros templados y enfriados por inmersión y en muchos tipos de aceros inoxidables. También se emplea para revestir materiales con objeto de resistir el fenómeno de corrosión, para resistencia a altas temperaturas o para resistencia a desgaste o combinaciones de estos fenómenos. Este proceso se denomina recargue.

La técnica puede adaptarse a pórticos, mástiles, sistemas de ejes motorizados o a carros.

Proceso de soldadura	Arco sumergido	Soldadura TIG	Soldadura MIG	Soldadura por arco por presión	Soldadura por puntos	Soldadura a gas
Acero dulce bajo carbono tipos SAE 1010 y 1020	R	S	S	R	R	R
Aceros de mediano carbono tipos SAE 1030 y 1050	R	S	S	R	R	R
Aceros de baja aleación tipos SAE 2340, 3145, 4130 y 4350	R	S	S	R	R	S
Aceros austeníticos inoxidables tipos AISI 301, 310, 316 y 347	R	R	R	R	R	S
Aceros ferríticos y martensíticos inoxidables tipos AISI 405, 410, 430	S	S	S	S	S	S
Aleaciones de alta resistencia y elevada temperatura	S	S	S	S	S	S
Hierro fundido y hierro gris	NR	S	NR	NR	NA	R
Aluminio y aleaciones de aluminio	NR	R	R	S	R	S
Cobre y aleaciones de cobre	NR	R	R	S	S	S
Plata	NR	R	S	S	NR	R
Oro, platino e iridio	NR	R	S	S	S	R
Titanio y aleaciones de titanio	NA		S	S	S	NA

Tabla 0.1: Recomendación de proceso de soldadura según tipo de material. R= Recomendado; S= Satisfactorio; NR= No Recomendado; Na= No Aplicable. Fuente: Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.

La forma más común de la implementación de este proceso es con un solo alambre de soldadura, lo que se conoce como SAW de un solo alambre. Caracterizado por:

- Un alambre, un alimentador, un cabezal de soldadura.
- Una fuente de poder, una unidad de control.
- Diámetro del alambre 1.6 – 5.0 mm (1/16 – 3/16”).
- Corriente de soldadura 200 – 1000 A.
- Generalmente se aplica en todos los sectores de la industria. Tasa de deposición de hasta 12 kg/h (26 lbs/h).

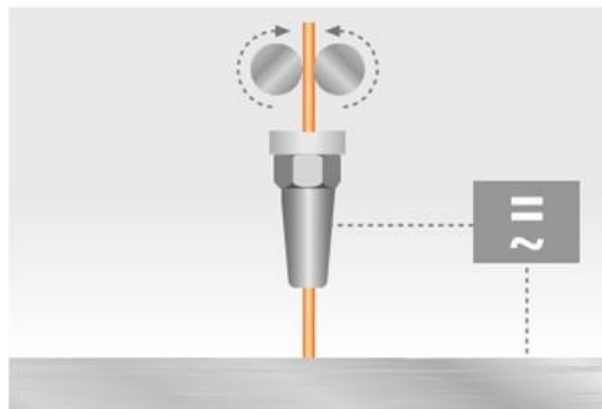


Figura 0.5: SAW de un solo alambre. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

1. Oportunidades respecto al proceso de soldadura por arco sumergido

La soldadura por arco sumergido aún en su forma más simple ya es un proceso altamente productivo. Las tasas de deposición en soldadura de un solo alambre, el método más aplicado, pueden ascender a 12 kg/h cuando las aplicaciones permiten el uso de alambres de gran diámetro a altas corrientes de soldadura. Una variedad de opciones han evolucionado a lo largo de los años con el objetivo de aumentar aún más la productividad de la soldadura; a menudo desarrolladas para cumplir con los desafíos de sectores específicos de la industria.

Se observan las siguientes opciones de procesos en la soldadura por arco sumergido (SAW) de la actualidad

1.a. SAW de dos alambres

- Dos alambres, un alimentador de alambre de 2 rodillos, una boquilla de contacto de 2 alambres.

- Una fuente de poder, una unidad de control.
- Diámetro del alambre de 1.2 – 3.2 mm (0.045 – 1/8”).
- Corriente de soldadura total de 400 – 1200 A.
- Generalmente se aplica en todos los sectores de la industria.
- Inversión moderada para actualizar a partir de la SAW de un solo alambre.
- Tasa de deposición de hasta 20 kg/h (44 lbs/h).

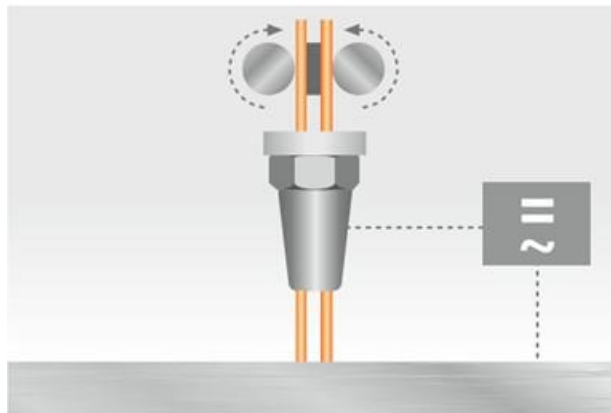


Figura 1.1: SAW de dos alambres. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

1.b. SAW de alambres en simultáneo

- Dos alambres, dos alimentadores, dos antorchas para soldar.
- Dos fuentes de poder, dos unidades de control.
- Diámetro del cable de 3.2 – 5.0 mm (1/8 – 3/16”).
- Corriente de soldadura total de 1200 – 2000 A.
- Construcciones navales, recipientes a presión, vigas pesadas, puentes, fabricación de alta mar.
- Inversión relativamente alta en comparación con SAW de un solo alambre.
- Tasa de deposición de hasta 25 kg/h (55 lbs/h).

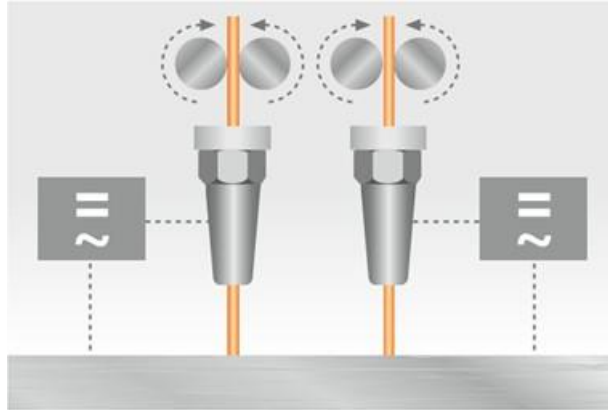


Figura 1.2: SAW de alambres en simultáneo. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

1.c. SAW en simultáneo de uno o dos alambres

- Tres alambres, un alimentador de 1 y 2 rodillos, un cabezal de alambre de uno o dos alambres
- Dos fuentes de poder, dos unidades de control
- Diámetro del cable de 2.4 – 4.0 mm (3/32 – 5/32")
- Corriente de soldadura total de 1100 – 1700 A
- Aerogeneradores, recipientes a presión
- Pequeña inversión incremental en comparación con SAW en simultáneo
- Tasa de deposición de hasta 30 kg/h (66 lbs/h)

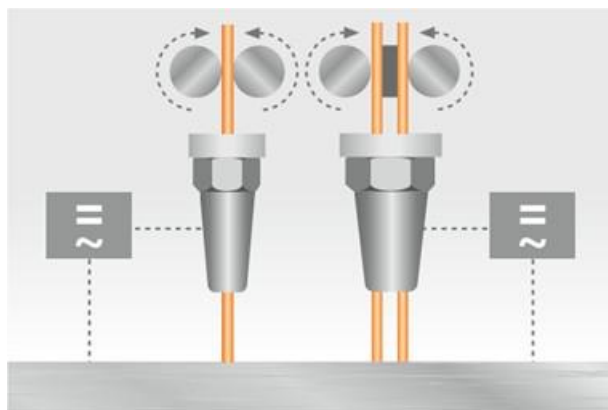


Figura 1.3: SAW en simultáneo de uno o dos alambres. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

1.d. SAW en simultáneo de dos alambres

- Cuatro alambres, alimentadores de 2 rodillos, dos cabezales de dos alambres
- Dos fuentes de poder, dos unidades de control
- Diámetros de alambre 1.6 – 3.2 mm (1/16 – 1/8")
- Corriente de soldadura total de 1500 – 2200 A
- Aerogeneradores, recipientes a presión
- Pequeña inversión incremental en comparación con SAW en simultáneo
- Tasa de deposición de hasta 35 kg/h (77 lbs/h)

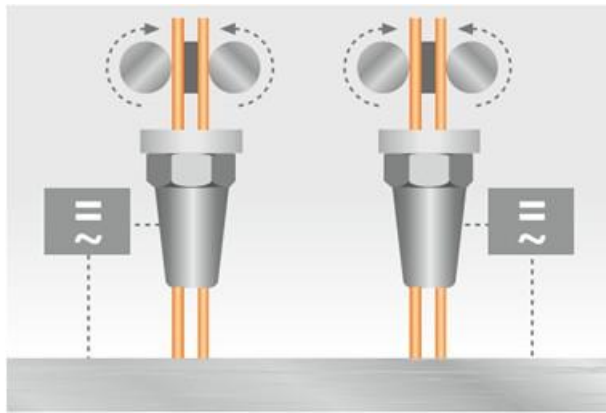


Figura 1.4: SAW en simultáneo de dos alambres. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

1.e. SAW de varios alambres

- Hasta cinco alambres, alimentadores, fuentes de alimentación y unidades de control
- Diámetros de alambre de 3.2 – 5.0 mm (1/8 – 3/16")
- Corriente total de soldadura 2000 – 5500 A
- Tuberías, construcción de alta mar, construcciones navales
- Alta inversión
- Tasa de deposición de hasta 100 kg/h (220 lbs/h) con cinco alambres

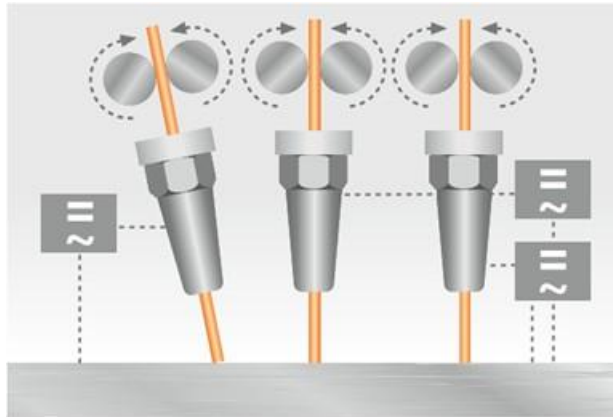


Figura 1.5: SAW de varios alambres. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2. Defectos de las soldaduras

En adelante se tratarán los posibles defectos que pueden afectar en mayor medida las propiedades o integridad de la junta soldada con el proceso de arco sumergido.

Algunos defectos son comunes a otros procesos de soldadura en los que interviene la fusión tanto de los metales de aporte como los metales de base.

Se listarán las causas posibles del defecto y su solución práctica.

2.a. Porosidad

Causa posible	Solución
Placa oxidada	Cepillo de alambre
Placa aceitosa	Desgrasar o precalentar
Placa húmeda	Precalentar
Fundente húmedo	Segundo secado de fundente
Cebador en el área de soldadura	Retirar el cebador
Capa de fundente demasiado fina	Aumentar la altura del lecho del fundente
Junta contaminada	Junta limpia
Soplo de arco	Verificar el cable a tierra

Tabla 2.1: Porosidad: causa y soluciones



Figura 2.1: Porosidad. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.b. Socavado

Causa posible	Solución
Voltaje demasiado alto	Ajustar los parámetros
Velocidad de desplazamiento demasiada alta	Ajustar la velocidad de desplazamiento

Tabla 2.2: Socavado: Causa y soluciones



Figura 2.2: Socavado. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.c. Escoria apretada

Causa posible	Solución
Voltaje demasiado alto	Ajustar los parámetros
Tamaño del alambre incorrecto	Ajustar los parámetros
Soldadura irregular	Ajustar los parámetros
Área de soldadura demasiado caliente	Enfriar
Preparación de junta demasiado estrecha	Adaptar diseño de junta

Tabla 2.3: Escoria apretada: Causa y soluciones

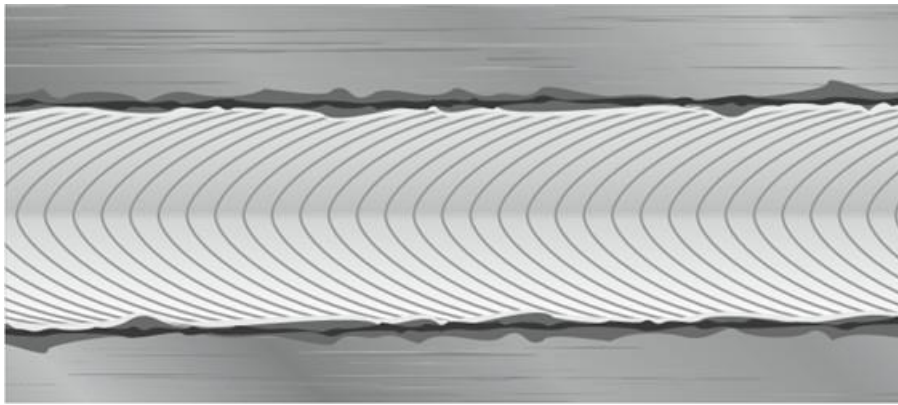


Figura 2.3: Escoria apretada. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.d. Perforación

Causa posible	Solución
Corriente demasiado alta	Ajustar los parámetros
Voltaje demasiado bajo	Ajustar los parámetros
Velocidad de desplazamiento demasiada baja	Ajustar los parámetros
Talón demasiado pequeño	Ajustar los parámetros
Empalme deficiente	Mejorar empalme

Tabla 2.4: Perforación: Causas y soluciones

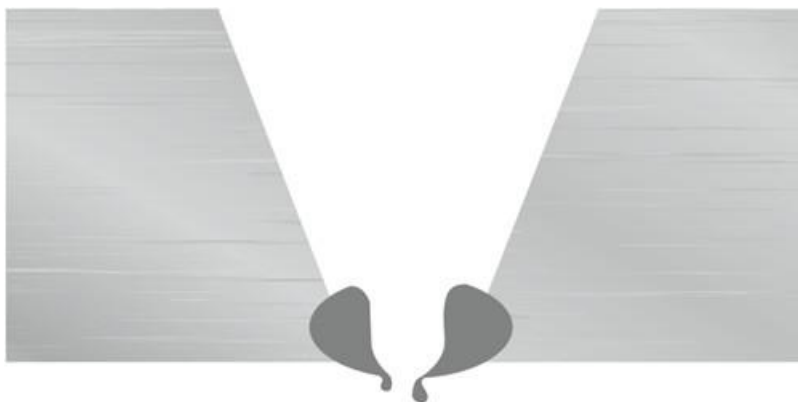


Figura 2.4: Perforación. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.e. Fracturas longitudinales

Causa posible	Solución
Perfil de cordón cóncavo	Ajustar parámetros y posición de antorcha
Relacion de profundidad/ancho de soldadura > 1	Ajustar parámetros
Empalme deficiente	Mejorar empalme
Construcción rígida	Precalentar
Duración excesiva del baño de soldadura	Ajustar parámetros

Tabla 2.5: Fracturas longitudinales: Causa y soluciones

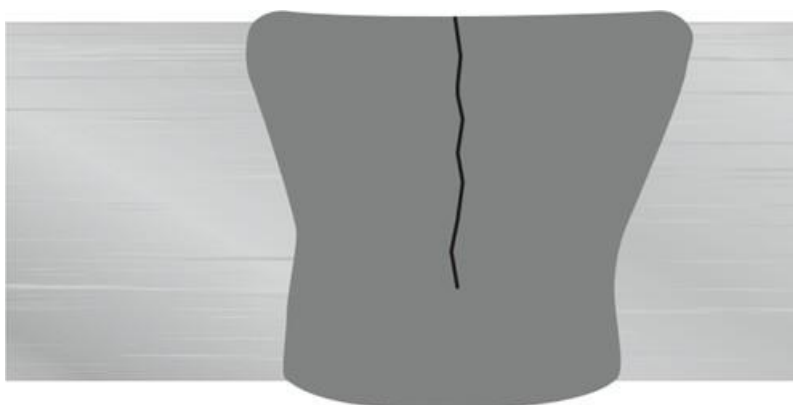


Figura 2.5: Fracturas longitudinales. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.f. Fracturas transversales

Causa posible	Solución
Tasas de enfriamiento demasiado altas	Precalentar, incrementar la temperatura entre pasadas, utilizar fundente precalentado
Restricción excesiva	Precalentar o adaptar diseño
Humedad en fundente	Segundo secado de fundente

Tabla 2.6: Fracturas transversales: Causa y soluciones

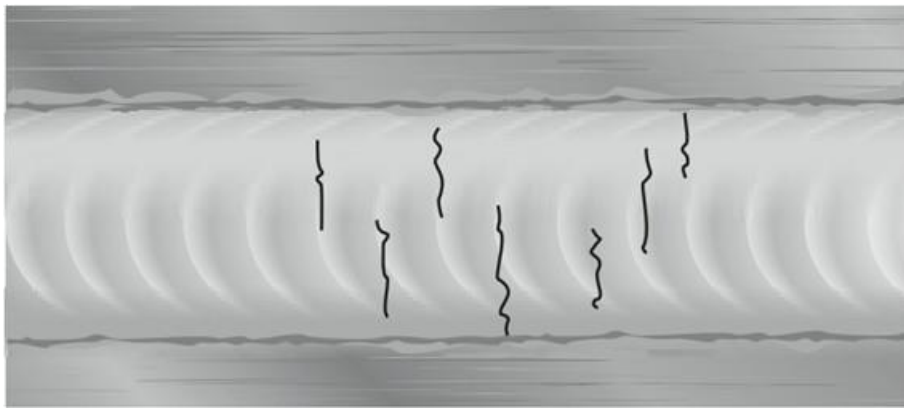


Figura 2.6: Fracturas transversales. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.g. Pobre apariencia de soldadura

Causa posible	Solución
Velocidad de desplazamiento demasiada alta	Ajustar los parámetros
Voltaje demasiado bajo	Ajustar los parámetros
Corriente demasiado alta	Ajustar los parámetros
Empalme deficiente	Mejorar empalme

Tabla 2.7: Pobre apariencia de soldadura: Causa y soluciones



Figura 2.7: Pobre apariencia de soldadura. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.h. Inclusiones de escoria

Causa posible	Solución
Fundente atrapado en una junta	Ajustar los parámetros y el ángulo de la antorcha. Cambiar diseño/ángulo de junta.
Angulo de apertura de junta demasiado pequeño	Adaptar diseño de junta.
Penetración insuficiente	Ajustar los parámetros.

Tabla 2.8: Inclusiones de escoria: causa y soluciones

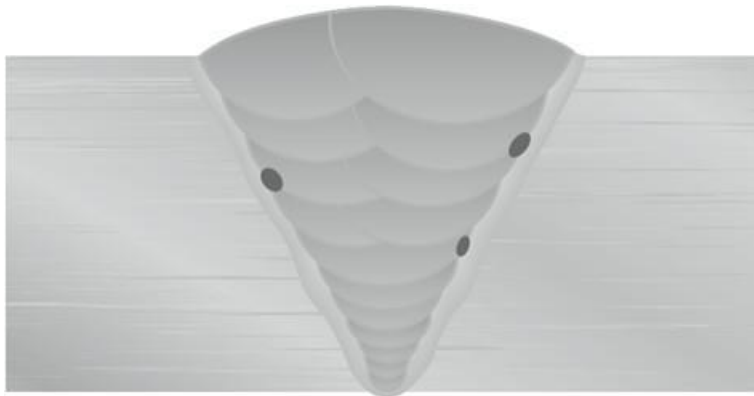


Figura 2.8: Inclusiones de escoria. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.i. Traslape frío

Causa posible	Solución
Temperatura de la placa demasiado baja	precalentar
Entrada de calor demasiado baja	Ajustar parámetros
Velocidad de desplazamiento demasiado alta	Ajustar parámetros
Polaridad negativa	Ajustar parámetros

Tabla 2.9: Traslape frío

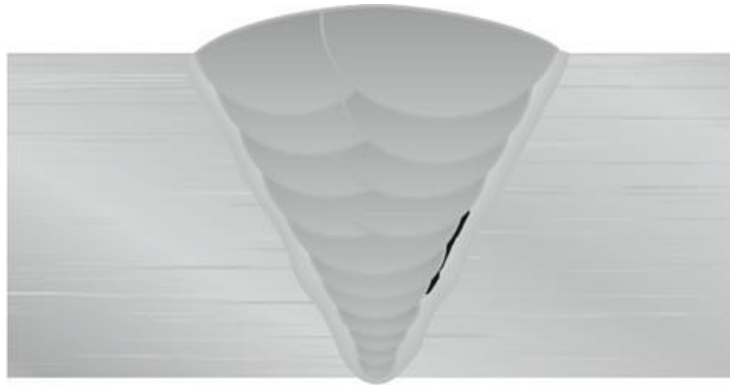


Figura 2.9: Traslape frío. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.j. Faltad de penetración

Causa posible	Solución
Corriente demasiado baja	Ajustar parámetros
Velocidad de desplazamiento demasiado alta.	Ajustar parámetros
Talón demasiado grande	Adaptar diseño de junta

Tabla 2.10: Falta de penetración

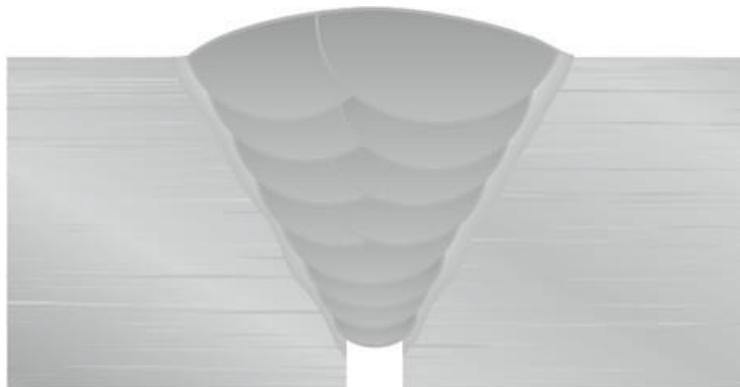


Figura 2.10: Faltad de penetración. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

2.k. Marca de hoyos

Causa posible	Solución
Profundidad del lecho de fundente excesiva	Reducir la profundidad del lecho de fundente
Alambre sucio	Utilizar un alambre nuevo
Placa sucia	Limpiar la placa o cambiar la combinación de alambre/fundente
Humedad	Precalentar placa
Combinación de alambre/fundente incorrecta	Cambiar a un alambre de desoxidación mayor y un fundente más activo

Tabla 2.11: Marca de hoyos

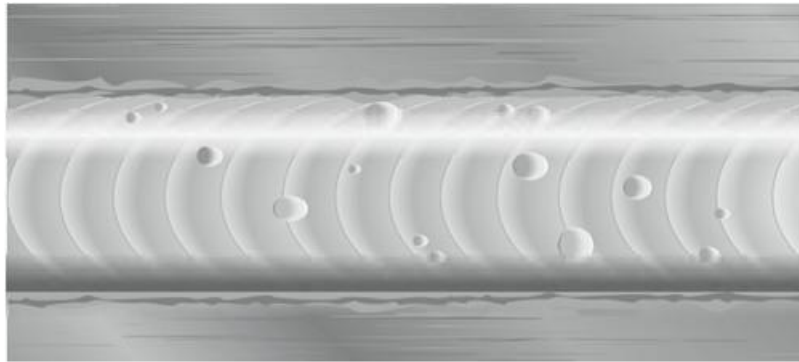


Figura 2.11: Marca de hoyos. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

Capítulo 5

Recomendaciones objetivas para la implementación del proceso de Soldadura por Arco Sumergido en la industria manufacturera

1. Seguridad e higiene

1.a. Humos y gases

El proceso SAW emite humos, aunque en mucha menos proporción que otros procesos de soldadura. Las emisiones nocivas pueden incluir CO (monóxido de carbono), óxido de hierro y humos de cobre y níquel procedentes del fundente, hilo, material de base o recubrimientos. Excepto en casos especiales, los niveles de humo y gas son bajos. Normalmente resulta suficiente la ventilación natural.

Los soldadores no deben inhalar el aire situado encima del baño. Si se trabaja en áreas reducidas se necesita una ventilación adicional.

1.b. Polvo

El fundente ocasiona una considerable cantidad de polvo cuando se cargan las tolvas y cuando se recicla después de la alimentación. Los operarios deben utilizar máscaras con filtro y mandiles en el manejo del fundente. El traje debe cubrir todo el cuerpo.

1.c. Fluoruros

Pueden irritar los pulmones y quemar por contacto los ojos y la piel y acumularse en los huesos donde, en cantidades excesivas, pueden degradar la estructura ósea.

Hay que evitar el contacto y la inhalación de humos y polvo provenientes del fundente.

1.d. Electricidad

La utilización del equipo SAW requiere grandes precauciones debido a las grandes intensidades empleadas normalmente.

Son indispensables; la puesta a tierra del equipo, los cables de adecuadas dimensiones y conexiones limpias, secas, ajustadas y bien aisladas. Se deben mantener los cables y conectores limpios adecuadamente para evitar sobrecalentamientos y arcos.

Hay que asegurar que el cable sea de sección suficiente para soportar las sobrecargas y evitar riesgos de descargas eléctricas, y fuego. Utilizar cables para soldadura que sean flexibles y estén bien aislados. Mantener los cables lo suficientemente alejados de la trayectoria de soldadura.

El soldador debe vestir ropas resistentes y sencillas en buenas condiciones para protegerse del calor y la suciedad, así como guantes de cuero. Debe protegerse de las superficies conductoras con zapatos de suela de goma como mínimo y, preferiblemente, trabajar sobre una superficie aislada como son, por ejemplo, las esteras de goma y los tableros de madera seca.

1.e. Protección personal

- Vestimenta de protección: Utilizar ropas de algodón o lana 100 % . Mantener limpias y secas.
- Protección de la cabeza: No se necesita casco para soldadura puesto que el fundente cubre el arco. Cubrir el punto de comienzo de arco es esencial antes de soldar. Se deben llevar puestas gafas para proteger los ojos durante la retirada de la escoria.

2. Almacenamiento, manipulación, recuperación y reutilización de fundentes y alambres

2.a. Alambres

- Guardar los alambres bajo condiciones secas en el empaque sellado original.
- Evitar el contacto entre el alambre y sustancias como el agua o cualquier otro tipo de líquido o vapor, aceite, grasa o corrosivo.
- No tocar la superficie del alambre con las manos desnudas.
- Evitar la exposición del alambre por debajo del punto de rocío.
- Guardar el alambre en su bolsa de plástico y la caja originales cuando no se usen.
- Aplicar el método “primero en entrar/primero en salir” para los alambres almacenados

2.b. Fundentes

- Los fundentes para soldadura en su empaque anti-humedad original pueden almacenarse de forma segura durante un período máximo de cinco años. Asegurándose de que el empaque no se dañe.

- En caso de que el empaque anti-humedad original se dañe, el fundente debe volver a envasarse en recipientes sellados y almacenarse bajo condiciones climáticas controladas de $15 - 35^{\circ}\text{C}$ ($60-95^{\circ}\text{F}$) y un máximo de 70 % de humedad relativa, durante un período máximo de un año.
- Al final del proceso de soldadura, el fundente de las tolvas sin protección y de los paquetes abiertos deberá almacenarse en un gabinete de secado o en una tolva de fundente calefaccionada a $150^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ ($300^{\circ}\text{F} \pm 45^{\circ}\text{F}$).
- Durante las operaciones de soldadura continua, el fundente sin usar se puede reciclar y se puede regresar a la tolva de fundente para su reutilización. Mantener aire comprimido en el sistema de reciclado, libre de humedad y aceite. Quitar la escoria y la cascarilla de laminación del fundente reciclado. Agregar al menos una parte de fundente nuevo a tres partes de fundente reciclado.
- Para aplicaciones críticas de hidrógeno, se debe volver a secar a una temperatura de $300 - 350^{\circ}\text{C}$ ($570-660^{\circ}\text{F}$) cualquier fundente del que se sospeche generación de hidrógeno durante un mínimo de dos horas. El segundo secado comienza cuando la cantidad completa de fundente ha alcanzado los 300°C (570°F). El fundente secado por segunda vez debe almacenarse a $150^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ ($300^{\circ}\text{F} \pm 45^{\circ}\text{F}$) antes de su uso

3. Aplicación de soldadura circunferencial

Estas son algunas de las pautas a seguir al realizar soldaduras de arco sumergido en ensambladuras soldadas circunferenciales.

- En las soldaduras por el diámetro exterior, coloque el alambre o el baño de soldadura por adelante del punto al cual se desplazará el baño de soldadura cuesta arriba hacia la línea central vertical de la soldadura. Por ejemplo, si se suelda un tubo, el depósito de metal estaría en la posición de las 11 en punto para una rotación hacia la derecha y el baño de soldadura se desplazaría a la posición de las 12 en punto a medida que se solidifica (Figura 3.1, Figura 3.2, figura 3.3). En las soldaduras exteriores, coloque el electrodo en ángulo hacia la dirección de desplazamiento. La cantidad de desplazamiento desde la línea central (posición de las 12 en punto) variará con cada diámetro de cilindro (Tabla 4).
- En las soldaduras interiores, coloque el alambre o el baño de soldadura por adelante del punto al cual se desplazará el baño de soldadura cuesta abajo hacia la línea central vertical de la soldadura. Por ejemplo, si se suelda en el interior de un tubo, el depósito de metal estaría en la posición de las 5 en punto para una rotación hacia la derecha y el baño de soldadura se desplazaría a la posición de las 6 en punto a medida que se solidifica (Figura 3.1, Figura 3.2, figura 3.3). En las soldaduras interiores, coloque el electrodo en ángulo alejado de la dirección de desplazamiento. La cantidad de desplazamiento desde la línea central (posición de las 6 en punto) variará con cada diámetro de cilindro (Tabla 4).
- Limite los tamaños de cordón al reducir el amperaje (velocidad de alimentación del alambre), al reducir el voltaje, usando un alambre de diámetro más pequeño o velocidades de desplazamiento más rápidas. Los cordones pequeños se solidifican más rápido y el fundente fundido se enfría más rápido para poder retirar la escoria con mayor facilidad.

- Sostenga el fundente con contenedores de fundente o protectores para mantener la profundidad de fundente adecuada en el arco.
- Varias pasadas pequeñas en metales pesados reducen la posibilidad de socavado y ofrecen un mejor contorno para eliminar la escoria con mayor facilidad.

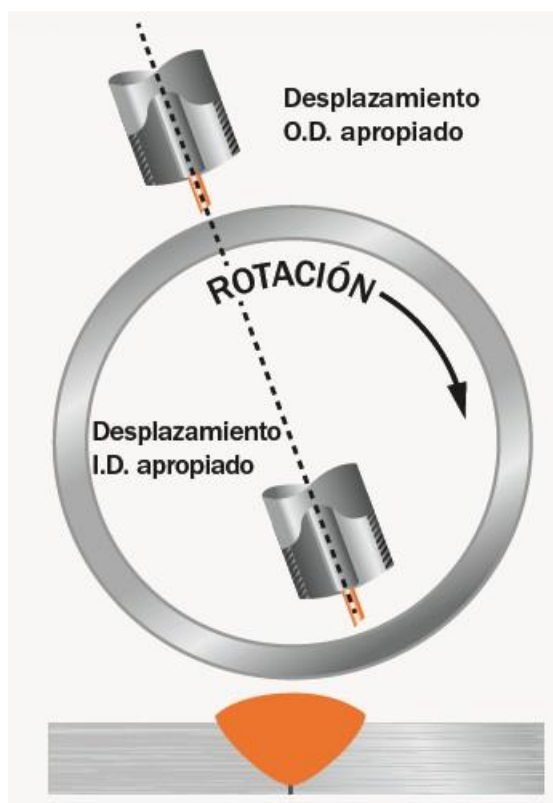


Figura 3.1: Desplazamiento adecuado para SAW circunferencial. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

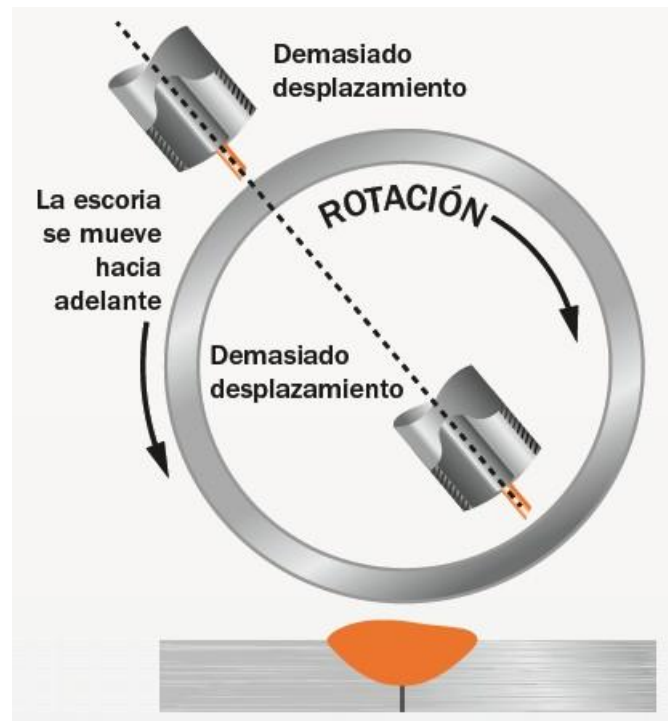


Figura 3.2: Desplazamiento excesivo para SAW circular. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

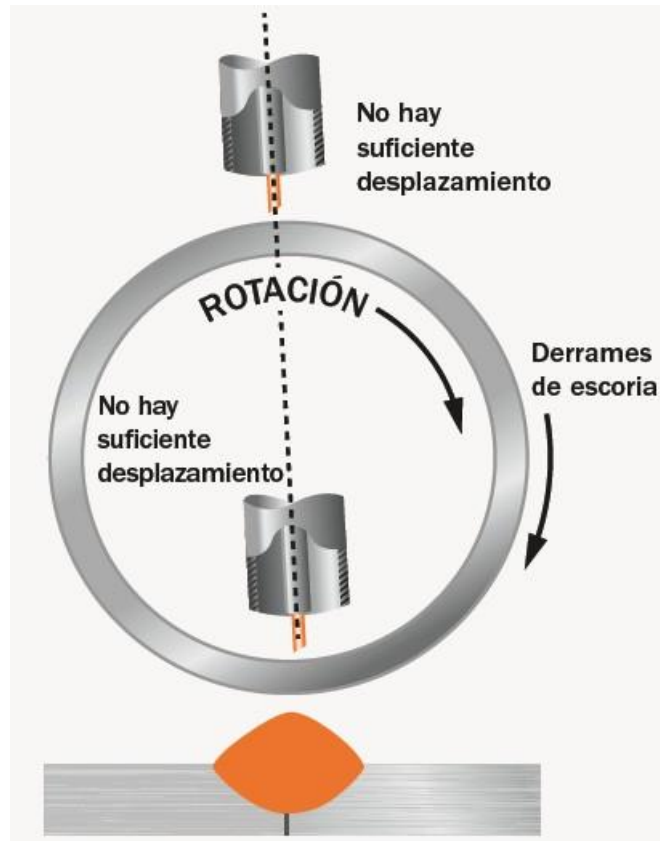


Figura 3.3: Desplazamiento insuficiente para SAW circular. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

Diámetro del cilindro	Desplazamiento del alambre adelante
2.5–7.6 cm (1–3")	10–19 mm (0.375–0.75")
7.6–46 cm (3–18")	19–25 mm (0.75–1")
46–91 cm (18–36")	32–38 mm (1.25–1.5")
91–107 cm (36–42")	38–44 mm (1.5–1.75")
107–122 cm (42–48")	44–50 mm (1.75–2")
122–183 cm (48–72")	50–64 mm (2–2.5")
183 cm+ (72-)	76 mm (3")

Tabla 3.1: Desplazamiento desde la l'nea de 12 o 6 en punto para soldadura circunferenciales. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

4. Aplicación de soldadura en ángulo

Las soldaduras de filete generalmente usan voltajes más bajos que las soldaduras de surco a los mismos amperajes (velocidad de alimentación del alambre). Al usar un solo alambre, se puede depositar una soldadura en ángulo de 10 mm (3/8") en una sola pasada o vuelta. Los

cordones de soldadura horizontal en ángulo de una sola pasada más grande pueden realizarse con varios alambres. Las soldaduras en ángulo de 8 mm (5/16") y de mayor magnitud se realizan en posición plana al reposicionar el trabajo. La soldadura por arco sumergido generalmente producirá soldaduras por arco con una penetración más profunda que las soldaduras del mismo tamaño realizadas con otros procesos de soldadura por arco.

La relación entre ancho y profundidad del cordón deben regularse cuidadosamente. El ancho de cordón debe ser un 20 – 25 % superior que la profundidad para evitar fracturas. Aun cuando se siguen al pie de la letra los procedimientos de soldadura, las soldaduras en ángulo se pueden fracturar debido a la naturaleza altamente restringida de las soldaduras en ángulo. La penetración completa de la junta en una soldadura de filete se producirá cuando el depósito de soldadura se encuentre en el punto alineado con el eje del alambre. Esto se puede lograr colocando la antorcha en ángulo o inclinando la pieza de trabajo para obtener el ángulo correcto de la junta (Figura 4.1).

Se deben tomar precauciones especiales para evitar problemas de sopleo del arco en las soldaduras de filete. Las piezas de trabajo que se entrecruzan pueden intensificar los problemas que pueden producir porosidad y un cordón de soldadura incontrolable.

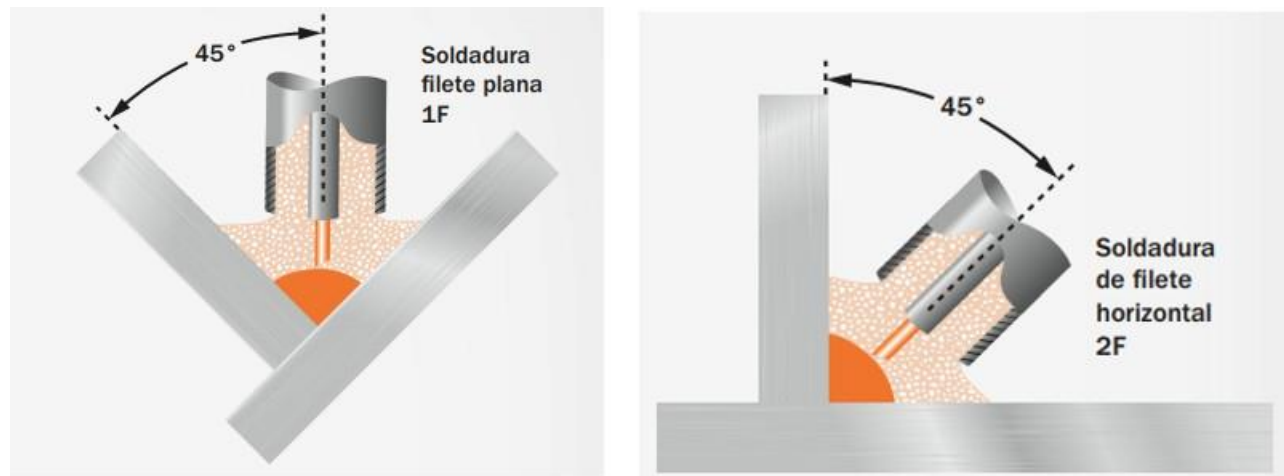


Figura 4.1: Colocación de la antorcha para soldaduras en ángulo SAW sobre uniones en T. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

5. Aplicación de soldadura traslapadas

Un buen empalme y la alineación adecuada del electrodo son las principales consideraciones para soldaduras traslapadas. Si las placas están unidas de manera muy ajustada, las aberturas producirán una forma de cordón deficiente y soldaduras potencialmente defectuosas. Es particularmente importante obtener una placa limpia, libre de todo tipo de contaminantes para una soldadura traslapada de buena calidad. Si el alambre no está correctamente posicionado, se producirá una penetración de junta incompleta o una perforación (Figura 5.1).

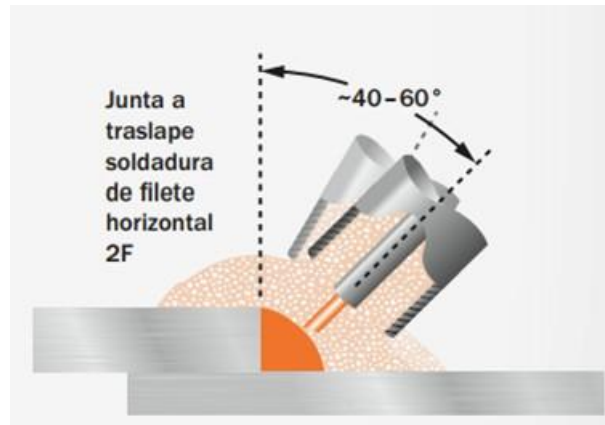


Figura 5.1: Colocación de la antorcha para soldaduras de filete SAW en juntas a traslape. Fuente: Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición

Capítulo 6

Analisis y conclusiones

Los métodos de soldadura, en su totalidad, se explican por la razón fundamental que rige la naturaleza de las superficies metálicas, de donde se desprende que la única forma de generar una unión mecánicamente resistente es generando un límite de grano entre las dos superficies a trabajar. Por lo que, en función de este axioma y considerando la inexistencia de superficies ideales se suministra energía y así, se funden los materiales involucrados logrando las condiciones necesarias para la unión. Se debe recordar que esta energía se puede aplicar en función de dos procesos, a saber: por presión o por fusión.

Dentro de los procesos por fusión se encuentran los que utilizan un arco eléctrico como fuente principal de energía para producir el aumento de temperatura de la zona de fusión. Este arco se produce por el flujo de electrones al interior de un conductor que al estar sometidos a una diferencia de potencial pueden traspasar el espacio libre entre el electrodo y el material base produciendo una chispa que da origen al arco.

El proceso SAW es uno de los métodos que utiliza la energía de este arco para fundir los materiales de unión más el electrodo y así generar el cordón de soldadura. Sus características principales son la sustitución del electrodo corriente por un alambre desnudo, que puede ser macizo o hueco (al cual igualmente se le denomina electrodo) y la utilización de fundente, componente de una granulometría especial que hace invisible el arco y entrega una gran cantidad de ventajas y propiedades tanto al cordón de soldadura como al operario, facilitando su trabajo.

La fabricación del alambre o hilo de soldadura es similar al de los electrodos comunes, con la diferencia que el recubrimiento se lo entrega el fundente al momento de realizar la unión de la pieza, este, por su parte tiene una composición química muy compleja y específica, pudiéndose sintetizar por fundición, cohesión o aglomeración, siendo esta última la más utilizada ya que por la baja temperatura con la que se trabaja, permite la incorporación de elementos aleantes que mejoran la calidad del cordón de soldadura resultante.

Para que este proceso sea realizable se debe contar con equipos especialmente fabricados para el propósito. Un equipo, rígido, básico de SAW estaría formado por una fuente de energía, un controlador automático, un cabezal de alimentación, un desenrollador de alambre (electrodo), un enderezador de alambre, una antorcha o tobera de alimentación, una tolva (fundente), un horno (fundente) y el conjunto de cables que hagan posible la unión eléctrica de todo el conjunto. Mientras que una configuración modular se compone de una fuente de poder y un tractor, componente autopropulsado en el que van montados todos los accesorios para desarrollar la soldadura mientras, este, se mueve sobre el o los materiales bases.

Mediante el controlador automático se puede variar la velocidad de alimentación de alambre

y el voltaje o corriente de trabajo, dependiendo de si se desea soldar a corriente constante o a voltaje contante. Estos tres parámetros mencionados juntos con el diámetro del alambre, la velocidad de soldadura y la polaridad de corriente se denominan parámetros principales y su variación afecta significativamente el resultado de la soldadura siendo imprescindible su manejo para la implementación del proceso, mientras que el modo de soldadura, la altura del flux, el Stick-Out, la posición e inclinación del electrodo y la posición de la masa o conexión a tierra se denominan parámetros secundarios y su variación producirá efectos en el resultado de la soldadura que pueden usarse para optimizar el proceso.

Una vez implementado el método SAW se deben tener en cuenta los ensayos necesarios para respaldar la calidad de la soldadura, estos ensayos suelen ser de carácterísticas no destructivas entre los que se destaca el ultrasonido que se presenta como una técnica rápida, transportable, de alta sensibilidad y que entrega resultados inmediatos, ahora bien si las exigencias mecánicas del componente son muy altas la radiografía se presenta como el método a elegir, mientras que si solo es necesario un ensayo superficial, partículas magnéticas o tintas penetrantes serian el método más adecuado.

La generación de poros se presenta como uno de los defectos más comunes en un proceso SAW, ya sea por acumulación de oxígeno o por atrapamiento de fundente, ambos eventos se previene manteniendo un adecuado ambiente de trabajo y respetando las condiciones de precalentamiento de la pieza, teniendo claro que la presencia de humedad o suciedades aumenta la probabilidad de aparición de estos defectos. Fuera de las condiciones externas si se programa correctamente los parámetros de soldadura la aparición de fallas o defectos es mínima.

Finalmente, el campo de aplicación de este método abarca desde uniones a tope o de filete en placas largas, plataforma de puentes y barcasas, recipientes de presión, líneas de panel, fabricación de tuberías, grandes tanques, construcción naval, vástagos y carcasas de cilindros, y básicamente, hasta cualquier unión cuyos materiales tengan un espesor superior a 6 mm (por la alta penetración propia de esta tecnología). Mientras que operacionalmente hablando el soldador debe contar solo con una calificación de soldador 2G y un curso que lo capacite para la manipulación de los equipos a utilizar.

Se debe recordar que son múltiples las opciones de soldadura que se pueden implementar con este método, las que estarán sometidas a las características geométricas de la pieza a soldar y a los requerimientos de deposición y rapidez del proceso, se hace énfasis que no siempre la opción de SAW de varios alambres, que genera la mayor deposición, será la más conveniente en términos de la eficiencia del proceso. Cada actividad se debe evaluar de forma independiente antes de decidir el tipo de configuración a utilizar.

Bibliografía

- [1] Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON. Edición 1995.
- [2] The Procedure Handbook of Arc Welding, Duodedima edición. Lincoln Electric Company. 1
- [3] Welding and Welding Technology, Edición 1973. Richard L. Little.
- [4] Catálogo Miller, Hobart Filler Metals, 2016. 4.a edición
- [5] Catálogo Lincoln Electric, The Welding Experts. Sistemas digitales de soldadura con Arco Sumergido. 2013.
- [6] Manual de sistemas y materiales de soldadura, INDURA.
- [7] Cotización: SOLDADURAS SOLTEC SPA
- [8] Air Liquide Welding, Libro de información.