



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

GRADO EN INGENIERÍA EN ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

DESARROLLO DE LA SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO DURANTE LA PRIMERA GUERRA MUNDIAL

Autor:

Ledesma Renedo, Javier

Tutor:

Martín Llorente, Oscar

Valladolid, diciembre 2025.

RESUMEN

Este proyecto estudia el desarrollo de la soldadura por arco eléctrico desde sus primeros avances a finales del siglo XIX hasta su consolidación durante la Primera Guerra Mundial. Se analizan los procesos de unión metálica previos, la evolución de los electrodos y las razones que explican la adopción predominante de la soldadura por arco eléctrico. Además, se examina el papel de la soldadura por arco eléctrico en sectores estratégicos como la industria naval, el ferrocarril y la aviación, en los que se convirtió en una herramienta fundamental para la fabricación y reparación rápida de estructuras metálicas durante la Primera Guerra Mundial. El estudio evidencia que la guerra actuó como un acelerador decisivo para la implantación de la soldadura por arco, al tiempo que puso de manifiesto sus limitaciones y orientó los avances técnicos posteriores. Se concluye que este periodo histórico resultó determinante para la evolución de la soldadura moderna y para la transformación de los sistemas de producción industrial del siglo XX.

PALABRAS CLAVE

Desarrollo industrial; Procesos de soldadura; Historia de la soldadura; Soldadura por arco eléctrico; Electrodo metálico desnudo; BMAW; Electrodo metálico revestido; Primera Guerra Mundial.

ABSTRACT

This project examines the development of electric arc welding from its earliest advances in the late nineteenth century to its consolidation during the First World War. It analyzes earlier metal-joining processes, the evolution of electrodes, and the reasons behind the widespread adoption of electric arc welding. In addition, it explores the role of electric arc welding in strategic sectors such as shipbuilding, railways, and aviation, where it became an essential tool for the rapid manufacturing and repair of metal structures during the First World War. The study shows that the war acted as a decisive accelerator for the implementation of arc welding, while also revealing its limitations and guiding subsequent technical progress. It concludes that this historical period was crucial for the evolution of modern welding and for the transformation of twentieth-century industrial production systems.

KEYWORDS

Industrial development; Welding processes; Welding history; Electric arc welding; Bare metal electrode; BMAW; Coated electrode; First World War.

ÍNDICES

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	OBJETO DEL PROYECTO	9
2	INTRODUCCIÓN.....	11
2.1	Tipos de Soldadura	15
2.1.1	Tipos de Unión.....	15
2.1.2	Tipos de Soldadura.....	18
2.1.3	Esquema de los Procesos de Soldadura	1
2.1.4	Definición de los procesos de Soldadura:.....	22
2.2	Historia de la soldadura	45
3	DESARROLLO DEL TFG	49
3.1	Contexto histórico	49
3.1.1	Unificación de Italia y Alemania y la modernización de Japón.....	49
3.1.2	Estados Unidos y la guerra de Secesión (1861-1865).....	53
3.1.3	La Segunda Revolución Industrial (1870-1914)	55
3.1.4	La Primera Guerra Mundial (1914-1919)	62
3.2	Historia de la Soldadura por Arco Eléctrico.....	71
3.3	Soldadura por arco con electrodo metálico desnudo.....	83
3.3.1	Proceso de Soldadura por arco con electrodo metálico desnudo	84
3.3.2	Equipo necesario, materiales utilizados para conformar el electrodo y desarrollo del proceso en la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo	87
3.3.3	Ventajas y Desventajas.....	92
3.3.4	Limitaciones técnicas y protecciones adoptadas	93
3.4	Aplicaciones de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo en la Primera Guerra Mundial	96
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	111
4.1	Relación entre el desarrollo tecnológico y la aparición de la soldadura por arco eléctrico.....	111
4.2	La Primera Guerra Mundial como acelerador del uso de la soldadura por arco eléctrico.....	112
4.3	Disponibilidad real de procesos de soldadura por arco antes y durante la guerra 113	
4.3.1	Soldadura por arco con electrodo metálico desnudo	113
4.3.2	Soldadura por arco con electrodo metálico revestido	114
4.4	Ventajas operativas de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo en el contexto bélico.....	114

4.5	Aplicaciones de la soldadura por arco eléctrico durante la Primera Guerra Mundial.....	116
4.5.1	Industria naval	116
4.5.2	Aviación	116
4.5.3	Ferrocarril y otros medios de transporte	117
4.6	Análisis comparativo entre la soldadura con electrodo metálico desnudo y con electrodo metálico revestido.....	117
4.7	Influencia de la Primera Guerra Mundial en la evolución posterior de la soldadura por arco eléctrico.....	118
5	CONCLUSIONES	121
6	Bibliografía	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 – Placa soldada mediante soldadura, adaptado de Albloushi y Albloushi (2019), bajo licencia CC BY-SA 4.0. (3).....	11
Ilustración 2 – Unión de tope y unión en ángulo. (12).....	16
Ilustración 3 – Unión de traslape con soldadura de filete a un lado y a ambos. (13).....	17
Ilustración 4 – Unión en “T” y unión en borde. (14).....	17
Ilustración 5 – Diversas formas de soldadura de filete (14).....	18
Ilustración 6 – Soldadura de tapón y en ranura. (14).....	19
Ilustración 7 – Soldadura de puntos. (14).....	20
Ilustración 8 – Soldadura de costura. (14).....	20
Ilustración 9 – Soldadura aluminotérmica, reacción en proceso. (18)	23
Ilustración 10 – Soldadura por Electroescoria (ESW). (23).....	26
Ilustración 11 – Evolución del proceso de soldadura por puntos de resistencia. (25).....	27
Ilustración 12 – Proceso de soldadura por costura de resistencia (RSEW). (26)	28
Ilustración 13 – Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). (31).....	31
Ilustración 14 – Proceso de soldadura por arco eléctrico TIG (GTAW). (33)....	34
Ilustración 15 – Soldadura por arco eléctrico MIG/MAG (GMAW) con pistola de soldadura. (35)	35
Ilustración 16 – Soldadura láser. (41)	38
Ilustración 17 – Unión por soldadura por fricción. (44).....	40
Ilustración 18 – Preparación para proceso de soldadura por explosión. (45)	41
Ilustración 19 – Proceso de soldadura con soplete. Fuente: Pixabay	42
Ilustración 20 – Esquema de soldadura por inducción. (48).....	43
Ilustración 21 – Reinos Mapa de la unificación de Italia. (57).....	50
Ilustración 22 – Mapa de la unificación de Alemania, 1815 - 1871. (59)	51
Ilustración 23 – Mapa de los bandos de la guerra de Secesión estadounidense. (64).....	54
Ilustración 24 – Plano del convertidor de Bessemer. (73).....	58

Ilustración 25 – Imagen del modelo alemán Junkers J1, primer avión metálico. (76).....	59
Ilustración 26 – Patente de Alexander Graham Bell. Máquina de telegrafía mejorada. (80)	60
Ilustración 27 – Sistemas de alianzas en 1907. (84)	63
Ilustración 28 – Mapa de Europa en 1914. (85).....	64
Ilustración 29 – Acorazado HMS Queen Elizabeth que participó en el bombardeo de los Dardanelos. (89).....	67
Ilustración 30 – Patente de Benardos y Olszewski: Arco eléctrico a través de un electrodo de carbón. (101)	73
Ilustración 31 – Patente de Charles L. Coffin: Electrodo metálico consumible. (102)	74
Ilustración 32 – Patente de Russell Meredith en 1942: soldadura por arco con gas de tungsteno (GTAW o TIG) (104)	78
Ilustración 33 – Patente de Robert M. Gage en 1957: soldadura por arco de plasma (PAW) (107).....	82
Ilustración 34 – Flujo de electrones e iones positivos en el arco eléctrico y longitud del arco. (115)	85
Ilustración 35 – Diagrama de soldadura por arco con electrodo metálico desnudo. (128).....	89
Ilustración 36 – Bulge antitorpedo del HMS Glatton, aproximadamente 1916. (135)	102
Ilustración 37 – Buque Fullagar. 1920 (139)	106
Ilustración 38 – Fokker Eindecker I, aproximadamente 1915. (141)	109

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 – Ecuación más común utilizada para la soldadura aluminotérmica (18).....	22
--	----

1 OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del presente estudio es analizar el proceso de desarrollo, evolución y aplicación de la soldadura por arco eléctrico durante el periodo comprendido entre finales del siglo XIX y la Primera Guerra Mundial, así como estudiar la influencia que este conflicto tuvo en su consolidación como tecnología fundamental de unión metálica. Para ello se examinan los antecedentes históricos y técnicos que hicieron posible la aparición de la soldadura por arco, los métodos empleados antes del estallido de la guerra, las circunstancias industriales que favorecieron su adopción, y el papel que desempeñó en sectores estratégicos como la industria naval, el ferrocarril o la naciente aviación militar.

El proyecto tiene como finalidad principal comprender por qué la soldadura por arco se convirtió en una herramienta esencial en aquel periodo y cuáles fueron los factores que determinaron la predominancia de determinados procesos frente a otros. En particular, se ahonda en la diferencia entre la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo y la soldadura con electrodo revestido, prestando especial atención al grado de madurez tecnológica que presentaban en los años previos a la Primera Guerra Mundial y a las razones que explican su implantación desigual en la industria bélica.

Asimismo, este trabajo busca contextualizar el desarrollo de la soldadura dentro de los avances industriales de la Segunda Revolución Industrial, poniendo de relieve la relación directa entre la expansión del acero, el crecimiento del tamaño de las estructuras metálicas y la necesidad de contar con métodos de unión más rápidos, resistentes y eficientes que los disponibles hasta entonces. A través de este análisis se pretende mostrar cómo la soldadura por arco eléctrico no fue únicamente un avance técnico, sino una respuesta a una demanda real generada por la transformación de los medios de transporte y de la producción industrial del momento.

Por último, este proyecto tiene por objeto valorar la influencia que ejerció la Primera Guerra Mundial en la evolución posterior de la soldadura por arco y en la consolidación de procesos más avanzados durante el siglo XX. El estudio de este periodo permite entender cómo las necesidades derivadas de la guerra impulsaron la estandarización, la profesionalización y el perfeccionamiento de la soldadura, y cómo estas mejoras condicionaron el desarrollo de nuevas tecnologías que siguen siendo fundamentales en la industria actual.

En conjunto, el propósito de este trabajo es ofrecer una visión global y fundamentada del origen y la evolución de la soldadura por arco eléctrico, analizando los factores históricos, técnicos e industriales que explican su

importancia y su papel determinante en la configuración de la ingeniería moderna.

2 INTRODUCCIÓN

La soldadura es, en esencia, un proceso mediante el cual se unen dos o más piezas (sean del mismo material o de materiales distintos) de manera permanente. Normalmente esta unión se consigue aplicando calor, a veces combinado con presión (aunque no siempre es necesaria), y puede realizarse con o sin material de aportación. Este material adicional, cuando se emplea, puede coincidir en composición con el material base o diferir de él, según las necesidades del proceso. (1)

La unión soldada se forma cuando las piezas que queremos juntar se calientan hasta alcanzar una temperatura lo bastante alta como para ablandarlas o incluso fundirlas, permitiendo que se mezclen y se conviertan en una única pieza sólida (tal como se muestra en la ilustración 1). En algunos métodos, se aplica presión para favorecer esa unión, mientras que en otros la propia fusión del material resulta suficiente. Cuando la geometría o el tipo de material lo requieren, se añade un metal de aportación para completar o reforzar la junta.

Conviene recordar que hoy en día hablamos de “material” en un sentido mucho más amplio que en los inicios de la soldadura. Aunque el metal sigue siendo el protagonista, existen procedimientos capaces de unir eficazmente plásticos, vidrio o cerámicas, lo que ha ampliado enormemente el campo de aplicación de esta tecnología. (2)

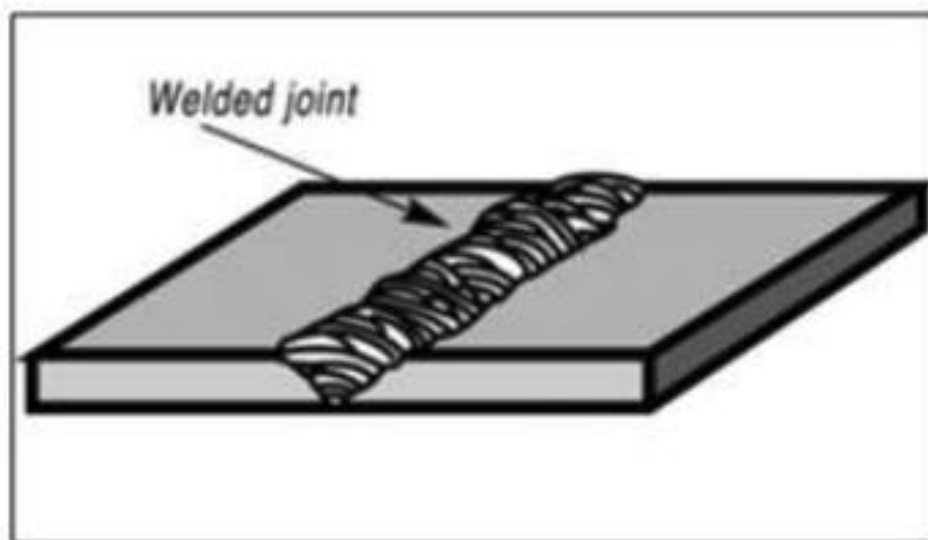


Ilustración 1 – Placa soldada mediante soldadura, adaptado de Albloushi y Albloushi (2019), bajo licencia CC BY-SA 4.0. (3)

Hoy en día, la soldadura se ha convertido en una pieza clave del desarrollo industrial a escala global. Sectores tan distintos como la construcción, la

petroquímica, la generación de energía, el transporte, la alimentación, la agricultura, la aeronáutica, la electrónica o la industria del automóvil (por mencionar solo algunos) no habrían alcanzado su nivel actual sin disponer de técnicas de soldadura fiables y cada vez más especializadas. De hecho, resulta difícil encontrar un proyecto tecnológico moderno en el que la soldadura no intervenga en alguna fase, aunque sea de manera indirecta. Todo este progreso ha ido configurando un concepto más amplio y moderno: el de las tecnologías de unión.

Dentro de ese conjunto, la soldadura destaca especialmente por su versatilidad, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Sirve para unir, reforzar o reparar materiales muy distintos entre sí, y precisamente por esa capacidad de adaptación se han invertido durante las últimas décadas cantidades considerables de esfuerzo humano y recursos económicos para impulsar su investigación y perfeccionamiento.

Gracias a este trabajo continuado, los procesos, los equipos y los consumibles han evolucionado de forma notable. Lo que en sus comienzos era un oficio casi artesanal ha terminado convirtiéndose en una disciplina altamente tecnológica, respaldada por estándares, maquinaria avanzada y métodos de trabajo cada vez más precisos. (4)

La soldadura ocupa un lugar indispensable tanto en el campo industrial como en el tecnológico, en gran medida por las ventajas que ofrece en términos de resistencia, durabilidad y aprovechamiento de recursos. Gracias a estas cualidades, se utiliza ampliamente en la fabricación, la construcción y el mantenimiento de estructuras. A continuación, se presenta una visión general de sus principales fortalezas y limitaciones.

Ventajas de la soldadura

- **Unión permanente:** Al soldar, las piezas se integran hasta formar un solo cuerpo, creando una conexión estable que no depende de elementos adicionales.
- **Alta resistencia:** Cuando se selecciona un material de aporte adecuado y se aplican técnicas correctas, la zona soldada puede superar en resistencia al material base, lo que se traduce en un ensamblaje más robusto.
- **Economía en material y costo:** Frente a otros métodos de unión mecánica, la soldadura resulta más rentable, ya que evita modificaciones complejas y añade muy poco peso a la estructura final.

- **Flexibilidad de ejecución:** A diferencia de ciertos procesos que exigen condiciones controladas, la soldadura puede realizarse tanto en planta como directamente en campo, lo que amplía notablemente su rango de aplicación.

Desventajas de la soldadura

- **Costo asociado a personal calificado:** Muchos procedimientos requieren la intervención de soldadores especializados, lo que incrementa el costo de operación.
- **Riesgos vinculados al consumo energético:** Los altos niveles de energía utilizados implican peligros inherentes si no se siguen protocolos de seguridad estrictos.
- **Unión no desmontable:** Su carácter permanente dificulta el desensamble o la reparación puntual, lo que la hace menos adecuada para sistemas que requieren mantenimiento frecuente.
- **Posibilidad de defectos:** Una soldadura mal ejecutada puede presentar fallas difíciles de detectar y corregir, comprometiendo tanto la calidad como la vida útil de la estructura.

En definitiva, la soldadura representa una herramienta esencial para la producción moderna gracias a su eficiencia y solidez. Sin embargo, sus limitaciones (como el coste de la mano de obra experta o la imposibilidad de separar fácilmente las piezas) obligan a evaluar métodos alternativos cuando se busca flexibilidad, desmontaje o mantenimiento periódico. (5)

A lo largo de la historia han surgido numerosos métodos de soldadura, pero para las estructuras metálicas el más relevante es la soldadura por fusión. Este proceso se basa en aplicar calor sobre los bordes de las piezas que se desean unir hasta llevarlos a su punto de fusión, permitiendo que se derritan y se mezclen. Al enfriarse y solidificarse, se forma una unión continua entre ambos materiales. En muchas de las técnicas de soldadura por fusión se emplean materiales de aporte o relleno, cuya función es mejorar la cohesión y resistencia de la unión una vez solidificados. (6)

La soldadura por fusión comenzó a difundirse ampliamente durante el siglo XIX, impulsada por el perfeccionamiento de los hornos de forja y por los avances en el estudio de la electricidad. Estos progresos abrieron el camino para la aparición de técnicas como la soldadura por llama y la soldadura por arco eléctrico. Entre ellas, la soldadura por llama (basada en el uso de combustibles como la mezcla oxiacetilénica) se convirtió en una de las primeras formas de aplicación industrial del proceso de fusión. (7)

La soldadura por arco eléctrico es un proceso de fusión que emplea un arco eléctrico como fuente de calor para unir metales. El procedimiento consiste en elevar los bordes de las piezas hasta su punto de fusión, de modo que, al enfriarse y solidificarse, formen una unión continua. Para generar ese calor, se establece una corriente eléctrica que crea un arco entre un electrodo y la superficie a soldar. Este arco, capaz de alcanzar temperaturas del orden de 6.000 °C, proporciona la energía necesaria para fundir el material base y, con ello, obtener uniones resistentes y duraderas. A continuación, en la ilustración 2 se muestra un esquema general de la soldadura por arco eléctrico con todos sus componentes. (8)

El desarrollo de la soldadura por arco eléctrico tomó forma hacia finales del siglo XIX, impulsado por los avances en electricidad y en el entendimiento del comportamiento de los metales. Aunque Sir Humphry Davy ya había observado el arco eléctrico a comienzos del siglo XIX, fue necesario esperar hasta 1881 para que este fenómeno se transformara en una técnica útil. Ese año, los investigadores rusos Nikolai Benardos y Stanislaus Olszewski presentaron el primer procedimiento práctico para unir metales mediante un arco generado con un electrodo de carbón. Este sistema, conocido como soldadura de arco de carbón, se convirtió en la primera aplicación real de la electricidad como medio de fusión para la unión metálica, inaugurando así la era de la soldadura por arco. (9)

A comienzos del siglo XX, la aparición del electrodo metálico revestido, patentado en 1907 por el ingeniero sueco Oscar Kjellberg, marcó un punto de inflexión en la evolución de la soldadura. Este nuevo tipo de electrodo permitió obtener cordones más estables y de mayor calidad, sentando las bases de lo que posteriormente se conocería como soldadura de arco metálico con electrodo revestido. Gracias a este avance, el proceso dejó de ser, con el paso del tiempo, una técnica experimental para convertirse en una herramienta versátil, rápidamente adoptada en la construcción naval, en la fabricación de maquinaria pesada y, con el tiempo, en sectores emergentes como la industria automotriz y la aeronáutica.

El estallido de la Primera Guerra Mundial aceleró este proceso de adopción. Durante el conflicto, la soldadura por arco eléctrico pasó de ocupar un papel marginal en la industria a convertirse en una tecnología indispensable para la fabricación y reparación de material militar. La necesidad de intervenir rápidamente en barcos dañados, mantener vehículos blindados operativos y producir grandes cantidades de equipamiento en plazos muy reducidos impulsó su uso de manera decisiva. En este contexto bélico, la soldadura por arco demostró su eficacia como método rápido, adaptable y capaz de responder a las exigencias de producción masiva que la guerra imponía. (7)

La soldadura por arco eléctrico se ha consolidado como una de las técnicas más empleadas en la fabricación industrial gracias a su capacidad para generar uniones resistentes y fiables en una amplia gama de materiales, desde aceros estructurales hasta aluminio y diversas aleaciones especiales. Su versatilidad se refuerza aún más con la existencia de múltiples variantes del proceso, lo que permite ajustar la técnica a necesidades muy distintas: desde trabajos que requieren alta precisión y control del calor, hasta aplicaciones rápidas y robustas en condiciones de campo o en entornos exteriores. (10)

A continuación, describiré los diferentes tipos de soldadura, explicando su metodología, así como las ventajas y desventajas de cada uno, y sus aplicaciones.

2.1 Tipos de Soldadura

Los procesos de soldadura se pueden clasificar de diversas maneras, una de ellas es según la naturaleza de los materiales que se desean unir, clasificándose en soldadura heterogénea y homogénea:

- **Soldadura heterogénea:** Se trata de unir materiales de diferente naturaleza, ya sea utilizando metal de aportación o no. También puede darse entre materiales del mismo tipo, pero empleando un metal de aporte distinto. Dentro de esta categoría, la soldadura puede ser blanda o fuerte, dependiendo de la temperatura y las características del proceso.
- **Soldadura homogénea:** En este caso, los materiales a unir y el metal de aportación, si se utiliza, son de la misma naturaleza. Cuando no se incorpora metal de aportación, se denomina **soldadura autógena**. Entre las técnicas más habituales de soldadura homogénea se encuentran la soldadura oxiacetilénica y la soldadura eléctrica, que a su vez puede ser por arco eléctrico o por resistencia, entre otras variantes.

La soldadura autógena se define, por tanto, como aquella que se realiza sin añadir material extra de aporte, uniendo los cuerpos únicamente mediante la fusión de sus propios metales, de modo que al enfriarse forman una sola pieza continua. (8)

2.1.1 Tipos de Unión

Como se mencionó anteriormente, la soldadura es un método para unir dos o más materiales, ya sea aplicando calor, presión o una combinación de ambos. La unión que se logra entre los materiales puede adoptar distintas geometrías, y esta forma no solo determina el tipo de soldadura más adecuado, sino que

también influye directamente en la resistencia y en el desempeño funcional de la unión. (5)

A continuación, se exponen los principales tipos de uniones según sus características geométricas:

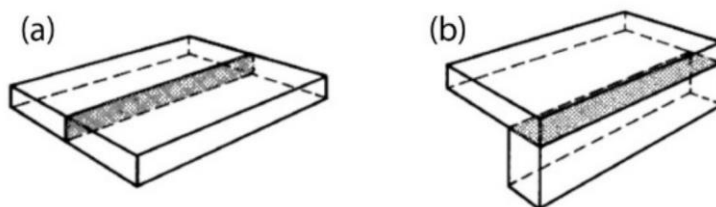
1. Unión de tope:

En este tipo de unión, las piezas se disponen en el mismo plano, con los bordes enfrentados, lo que permite obtener una soldadura continua y resistente. Dependiendo del caso, se puede realizar con o sin preparación de los bordes, como el biselado, especialmente cuando se trata de materiales más gruesos, con el objetivo de asegurar una penetración completa del metal fundido y lograr una unión firme y duradera. (11)

2. Unión en ángulo:

En este tipo de unión, las piezas se colocan formando un ángulo y la soldadura se realiza en el vértice donde se encuentran. Este tipo de unión es muy común en la construcción de estructuras como cajas, contenedores o marcos metálicos. Dependiendo de los requerimientos, se puede ejecutar mediante soldadura a filete o a ranura, adaptando la técnica a las necesidades tanto estructurales como estéticas. (11)

A continuación, se muestra imagen de la soldadura de tope y en ángulo:



a) Unión de tope

b) Unión en ángulo

Ilustración 2 – Unión de tope y unión en ángulo. (12)

3. Unión de traslape:

La unión por traslape consiste en superponer dos piezas como se muestra en la imagen a continuación, generando así una mayor superficie de contacto para la soldadura. Este tipo de unión se emplea con frecuencia en chapas metálicas, tubos y estructuras ligeras. Por lo general, se utiliza la soldadura de filete para garantizar que la unión sea fuerte y continua. (2)

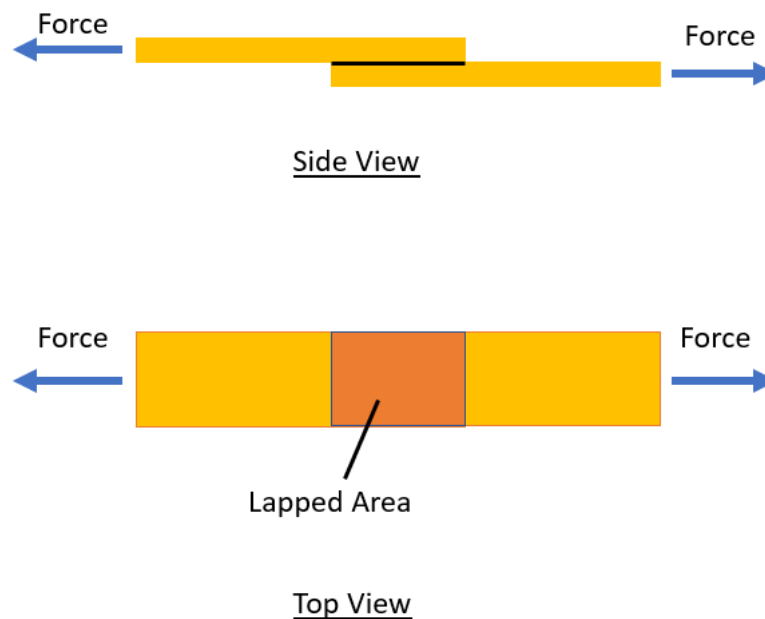


Ilustración 3 – Unión de traslape con soldadura de filete a un lado y a ambos. (13)

4. Unión en T:

Este tipo de unión se obtiene al colocar una pieza perpendicular a la otra, formando un ángulo de 90 grados y creando un perfil en forma de “T”, tal como sugiere su nombre. (2)

5. Unión en borde:

La unión en borde se utiliza cuando dos piezas están colocadas de manera paralela, con los bordes uno junto al otro. Es común en la fabricación de chapas metálicas, carcasas y otros componentes que deben soportar cargas ligeras, ofreciendo una unión simple pero funcional. (2)

En la imagen a continuación se puede observar una unión en T y en borde:

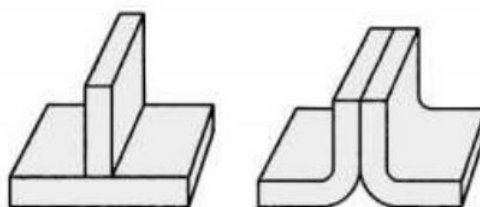


Ilustración 4 – Unión en “T” y unión en borde. (14)

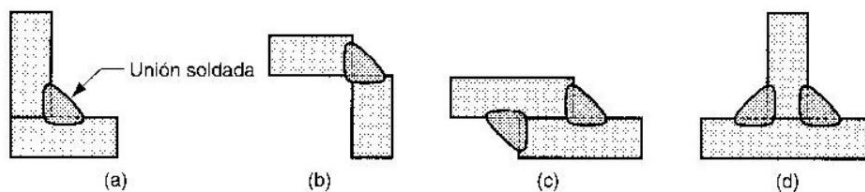
2.1.2 Tipos de Soldadura

Tras analizar los principales tipos de uniones, las soldaduras se pueden clasificar según la forma de la soldadura o el tipo de ranura que se llenará con el material de aporte. Es importante señalar que el tipo de ranura está determinado por las características geométricas de la unión o el tipo de unión, como los mencionados en el apartado anterior. A continuación, se describirán los principales tipos de soldadura según esta clasificación:

1. Soldadura de Filete (Fillet Weld):

La soldadura de filete se utiliza para unir dos piezas que se encuentran en ángulo o de forma perpendicular, como ocurre en las uniones en “T” o en esquinas. El metal fundido se deposita en la intersección de las piezas, formando una sección transversal de tipo triangular. Este tipo de soldadura es muy apreciado por su resistencia a las cargas y por la facilidad con la que puede aplicarse en distintas posiciones. Por eso es común en la fabricación de estructuras metálicas, como marcos, vigas o soportes, ya que garantiza una unión sólida en componentes que están sometidos a fuerzas en varias direcciones. (2)

En la siguiente imagen se pueden apreciar las distintas formas de soldadura de filete:



- (a) Unión de esquina con filete interno único.
- (b) Unión de esquina con filete externo único.
- (c) Unión sobrepuesta con filete doble.
- (d) Unión en T con filete doble.

Ilustración 5 – Diversas formas de soldadura de filete (14)

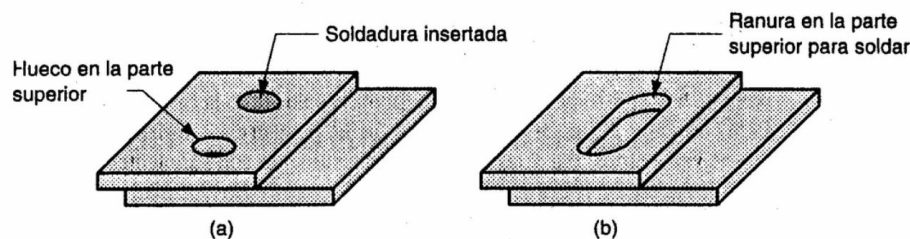
2. Soldadura de Ranura (Groove Weld):

Este tipo de unión por soldadura se aplica cuando los bordes de las piezas tienen una forma específica, como V, U, J o incluso recta, creando una ranura donde se deposita el metal de aporte. Por lo general, se realiza mediante soldadura por arco eléctrico o con oxígeno y gas combustible. La configuración de la ranura permite que el material fundido penetre de manera más profunda y uniforme, algo especialmente importante en piezas más gruesas. Se utiliza principalmente en estructuras críticas que requieren alta resistencia, como

recipientes a presión, componentes pesados, partes de puentes, tuberías de gran diámetro y en la industria naval. Este tipo de soldadura garantiza una unión sólida y duradera, capaz de soportar cargas extremas. (2)

3. Soldadura de tapón (Plug Weld):

La soldadura de tapón o en ranura consiste en rellenar un agujero practicado en una pieza metálica con material de soldadura para unirla a otra pieza que queda debajo como se puede ver en la imagen a continuación. Este procedimiento reemplaza a remaches o tornillos en estructuras superpuestas, proporcionando una unión sólida, duradera y con un acabado limpio desde el punto de vista estético. (11) Este tipo de soldadura se emplea sobre todo en la industria automotriz, para unir paneles de carrocería de manera discreta. También es habitual en la unión de chapas metálicas en estructuras industriales y en reparaciones de carrocerías o componentes metálicos, ya que permite lograr una conexión fuerte sin añadir peso innecesario. (15)



- a) Soldadura de tapón.
- b) Soldadura en ranura.

Ilustración 6 – Soldadura de tapón y en ranura. (14)

4. Soldadura de puntos (Spot Weld):

La soldadura de puntos es un método que une dos piezas de metal laminado aplicando presión y corriente eléctrica en puntos específicos. En este proceso, las piezas se colocan entre dos electrodos de cobre que suministran una corriente de alta intensidad. El calor generado por la resistencia de los metales funde el material en la zona de contacto y, junto con la presión, forma un “punto” de soldadura como se puede observar en la siguiente imagen. Este tipo de soldadura, que pertenece a la familia de la soldadura por resistencia, es ideal para ensamblar piezas delgadas. Se realiza de manera rápida, con gran precisión y sin necesidad de material de aporte, ya que el propio metal de las piezas se funde. Se emplea ampliamente en la industria automotriz, en la fabricación de electrodomésticos y en estructuras ligeras. (16)

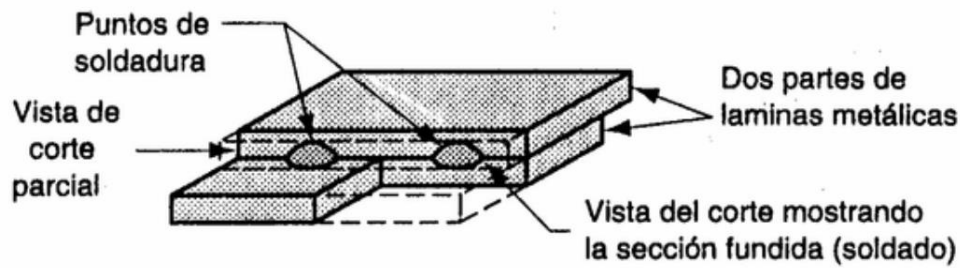


Ilustración 7 – Soldadura de puntos. (14)

5. Soldadura de costura (Seam Weld):

En este tipo de soldadura, al igual que en la soldadura de puntos, se combina calor y presión para unir dos piezas metálicas a lo largo de una línea. El resultado puede ser un cordón continuo, formando una costura completa, o una línea de puntos intermitentes. La corriente eléctrica genera el calor necesario, mientras que la presión asegura que las piezas se fusionen correctamente. Este procedimiento resulta especialmente útil en aplicaciones que requieren soldaduras fuertes y continuas, como en la fabricación de tanques y recipientes a presión, donde la hermeticidad y la resistencia son fundamentales. También se emplea en la construcción de grandes estructuras metálicas, como puentes, gracias a su capacidad para crear uniones duraderas y estancas. (2)

La soldadura de costura es bastante parecida a la soldadura de puntos, pero con la diferencia de que no se generan puntos de unión aislados. En lugar de eso, se forma un cordón continuo o una línea de puntos a lo largo de toda la unión, lo que permite una conexión más extensa y continua entre las piezas.

A continuación, se puede observar, en la siguiente imagen, la soldadura de costura:

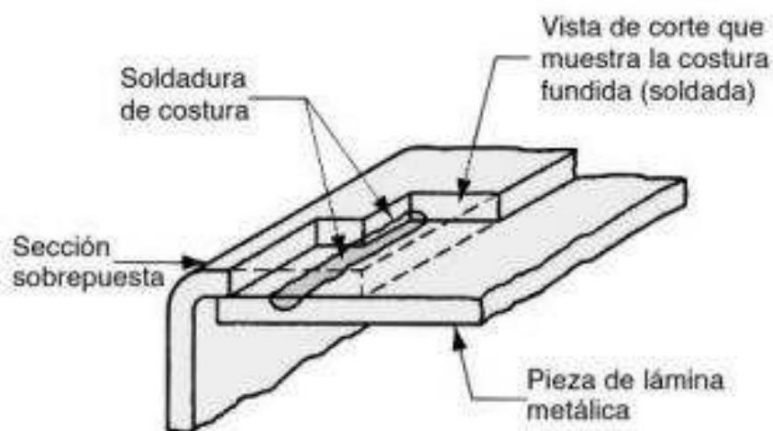
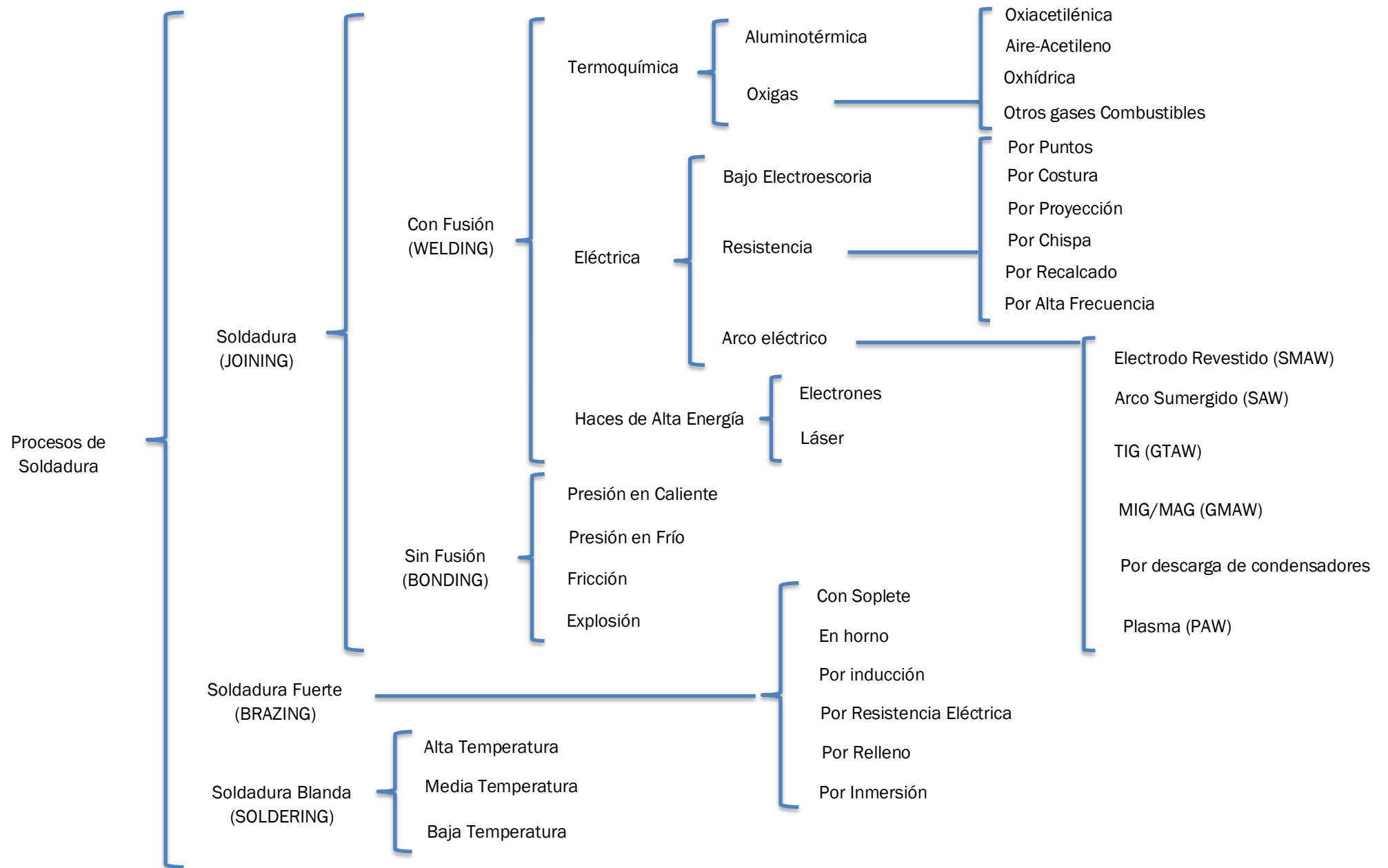


Ilustración 8 – Soldadura de costura. (14)

2.1.3 Esquema de los Procesos de Soldadura

A continuación, se muestra un esquema de los procesos de soldadura:



2.1.4 Definición de los procesos de Soldadura:

1. Soldadura (JOINING)

1.1 Soldadura con Fusión (WELDING):

La soldadura por fusión consiste en calentar las piezas que se desean unir hasta llevarlas a su punto de fusión, de modo que el propio metal base se mezcle y solidifique, formando una unión permanente. En muchos casos se emplea un material de aporte para reforzar la unión o rellenar huecos que quedarían sin cubrir.

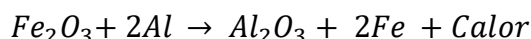
A continuación, se describen los principales tipos de soldadura por fusión y las aplicaciones en las que suelen utilizarse. (5)

1.1.1. Soldadura Termoquímica:

La soldadura termoquímica es un proceso en el que el calor necesario para fundir y unir metales proviene de una reacción química de carácter exotérmico. Una vez activada la reacción, el proceso no requiere ninguna fuente de energía externa. Dentro de esta categoría se incluyen dos variantes principales: la soldadura aluminotérmica y la soldadura oxigas:

Soldadura aluminotérmica:

En la soldadura aluminotérmica, el proceso comienza colocando en un molde una mezcla de óxido metálico y aluminio (como se aprecia en la ilustración 11). Al activar esta mezcla con una chispa, se desencadena una reacción exotérmica que alcanza temperaturas muy elevadas. El metal fundido resultante fluye hacia la zona de unión, rellenando el molde y formando una soldadura homogénea y muy resistente. (17)



Ecuación 1 – Ecuación más común utilizada para la soldadura aluminotérmica (18)

Este método destaca por su capacidad para generar uniones muy fuertes y estables sin necesidad de una fuente de energía externa (algo especialmente útil en trabajos realizados lejos de instalaciones industriales). No obstante, implica ciertos riesgos para el operador debido al manejo de materiales altamente reactivos, y tampoco resulta adecuado para piezas pequeñas o delicadas, ya que el calor producido durante la reacción es extremadamente elevado.

Entre sus aplicaciones más habituales se encuentran la unión de rieles de ferrocarril, donde es fundamental obtener una conexión continua y resistente, la reparación de componentes metálicos de gran tamaño y la conexión de

conductores eléctricos (sobre todo en sistemas de alta tensión), gracias a la excelente conductividad y robustez de las uniones resultantes. Su presencia en estos campos se explica por la capacidad del proceso para soportar cargas elevadas y condiciones ambientales exigentes. (17)



Ilustración 9 – Soldadura aluminotérmica, reacción en proceso. (18)

Soldadura Oxigas:

La soldadura Oxigas es un proceso termoquímico en el que una llama intensa, generada por la combustión de un gas combustible en presencia de oxígeno, se aplica directamente sobre las piezas que se van a unir. En este caso, el calor proviene exclusivamente de la reacción química entre ambos gases. Dentro de este método se distinguen cuatro variantes, determinadas por el tipo de combustible que interviene en la mezcla:

- **Oxiacetilénica:** Este proceso funciona mezclando oxígeno (O_2) con acetileno (C_2H_2) en un soplete, generando una llama muy caliente que permite fundir los bordes del material base. Cuando hace falta, también se puede añadir material de aporte para completar la unión. Una de sus ventajas es que ofrece bastante control sobre la llama y, además, es un método portátil, ya que no depende de una fuente eléctrica. Por eso resulta práctico para trabajos en exteriores, aunque no es tan versátil como otros tipos de soldadura Oxigas.

En cuanto a sus aplicaciones, suele usarse para reparar maquinaria agrícola y automotriz, unir tuberías de cobre, realizar trabajos artesanales en metal, arreglar estructuras metálicas ligeras y ejecutar soldaduras en instalaciones de gas. (14)

- **Aire-acetileno:** Este proceso utiliza el oxígeno del propio aire, en lugar de oxígeno puro, combinado con acetileno (C_2H_2). Con esta mezcla se obtiene una llama de temperatura moderadamente alta, suficiente para calentar y fundir materiales que no requieren demasiada energía para fundirse. Para ello se emplea un soplete diseñado para mezclar acetileno con aire, lo que hace que la combustión sea más sencilla y bastante económica.

Su mayor ventaja es precisamente el bajo coste de operación: es un método portátil y no necesita botellas de oxígeno, lo que facilita mucho su uso en trabajos rápidos o en espacios reducidos. Eso sí, al generar una temperatura más baja, solo es adecuado para materiales con un punto de fusión relativamente bajo. Por eso se utiliza sobre todo en fontanería para soldar o reparar tuberías de cobre, en pequeños trabajos de mantenimiento y en uniones de metales no ferrosos. (19)

- **Oxídrica:** En este tipo de soldadura se emplea una mezcla de hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) que, al pasar por un soplete especial, genera una llama muy intensa. Esta llama es especialmente limpia y estable, lo que permite trabajar con gran precisión y alcanzar temperaturas lo bastante altas como para fundir metales ligeros o realizar uniones delicadas.

Una de sus mayores ventajas es la pureza de la combustión: al reaccionar el hidrógeno con el oxígeno, el único residuo generado es vapor de agua. Esto convierte al proceso en una de las opciones más limpias y controladas, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental. Claro está, esta misma precisión exige experiencia y habilidad por parte del operador.

Por ese motivo, su uso se concentra en áreas donde se requiere un nivel de detalle muy alto, como la fabricación de componentes electrónicos, la joyería, la odontología o cualquier aplicación que implique materiales finos o sensibles al calor. (20)

- **Otros gases combustibles:** También es posible emplear oxígeno (O_2) combinado con otros gases, como propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) o incluso gas natural (metano, CH_4), para generar una llama capaz de fundir los metales que se quieren unir. Si bien estas mezclas no alcanzan temperaturas tan altas como las obtenidas con oxígeno y

acetileno, proporcionan el calor suficiente para realizar uniones fiables en distintos tipos de metales.

Una de las grandes ventajas de este método es que los combustibles utilizados suelen ser más económicos y fáciles de conseguir. Propano y butano, por ejemplo, están mucho más disponibles que el acetileno, lo que convierte este tipo de soldadura en una alternativa accesible y rentable. (21)

1.1.2. Soldadura Eléctrica:

La soldadura eléctrica es un proceso que utiliza la electricidad para producir el calor necesario para fundir el metal y unir las piezas metálicas. Este calor puede ser producido por electroescoria, por arco eléctrico o por resistencia:

Soldadura bajo Electroescoria (ESW):

La soldadura bajo electroescoria es un proceso que se realiza principalmente en posición vertical y aprovecha el calor generado por la resistencia eléctrica a través de una capa de escoria fundida para unir materiales de gran espesor. Durante la operación, se forma un baño de escoria que se calienta hasta fundirse gracias a la corriente eléctrica suministrada por los electrodos. Esta escoria actúa como un aislante térmico, protegiendo la unión de la atmósfera y permitiendo que el calor penetre profundamente en el material base. En la siguiente imagen se puede ver una imagen del proceso.

Este método se emplea sobre todo para soldar piezas gruesas, como vigas, columnas o recipientes a presión, y es muy habitual en la construcción naval y en la fabricación de maquinaria pesada, ya que permite realizar soldaduras profundas en una sola pasada. Su eficacia se aprecia especialmente en estructuras grandes que necesitan resistencia y durabilidad. Entre sus limitaciones, destaca que solo se puede ejecutar en posición vertical y que el enfriamiento del cordón es lento, lo que puede generar tensiones internas que afecten la integridad de la unión, sobre todo en materiales muy gruesos. (22)

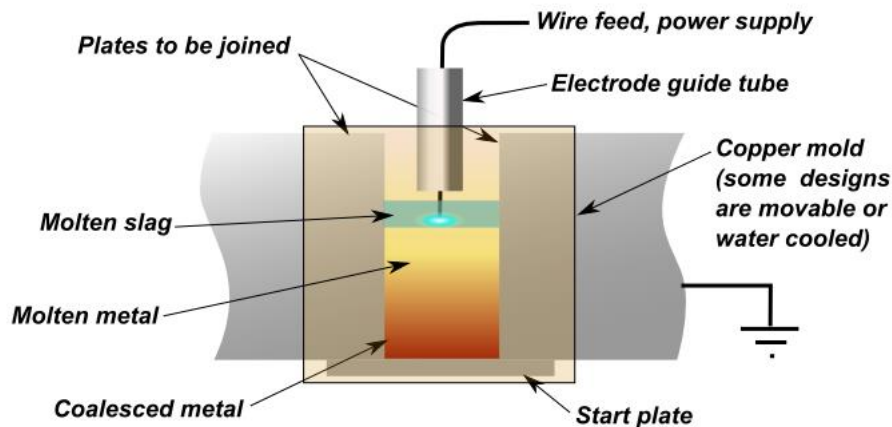


Ilustración 10 – Soldadura por Electroescoria (ESW). (23)

Soldadura por Resistencia:

La soldadura por resistencia es un método de unión que aprovecha el calor generado por la resistencia eléctrica al pasar la corriente a través de las piezas que se quieren unir. Este calor, combinado con la presión aplicada sobre los materiales, permite fusionarlos sin necesidad de añadir metal de aporte. Es un proceso muy eficiente y controlado, ampliamente utilizado en la industria gracias a su rapidez, precisión y capacidad para producir uniones sólidas y duraderas, incluso en metales de distintos espesores. (14)

Existen varios procesos de soldadura por resistencia, entre los que destacan los que se describen a continuación:

- **Soldadura por puntos:** La soldadura por puntos de resistencia, conocida como RSW (Resistance Spot Welding), es un método que sirve para unir dos o más láminas de metal aplicando a la vez presión y corriente eléctrica en puntos concretos. Para ello se utilizan electrodos de cobre o aleaciones de cobre que presionan las piezas, mientras una corriente eléctrica de alta intensidad pasa brevemente por el punto de contacto. Esto genera calor debido a la resistencia del metal, fundiendo localmente el material y formando un punto de soldadura al enfriarse y solidificarse como se puede apreciar en la imagen a continuación.

Este proceso es rápido y eficiente, ideal para unir láminas delgadas sin necesidad de material de aporte, ya que la unión se logra mediante la fusión localizada del propio metal base gracias al calor generado por la corriente eléctrica. Su repetibilidad lo hace perfecto para producciones en serie, y además resulta económico y preciso, con un consumo de energía moderado y mínima deformación del material. Sin embargo, no es tan efectivo para piezas gruesas.

La soldadura por puntos se emplea sobre todo en la industria automotriz, especialmente en la fabricación de carrocerías, donde se necesitan numerosos puntos de unión en estructuras ligeras. También es frecuente en la producción de electrodomésticos, muebles metálicos, paneles eléctricos y en la unión de láminas de acero galvanizado o aleaciones de aluminio en distintos procesos industriales. (24)

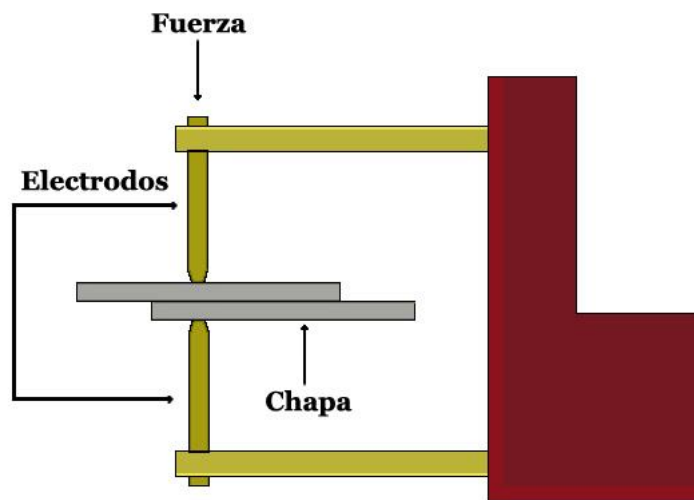


Ilustración 11 – Evolución del proceso de soldadura por puntos de resistencia. (25)

- Por costura: La soldadura por costura de resistencia, o RSEW (Resistance Seam Welding), es una variante de la soldadura por puntos en la que los electrodos tienen forma de rodillos que giran mientras aplican presión y corriente eléctrica sobre las piezas. En este método, las láminas metálicas que se van a unir se colocan entre los rodillos, como se muestra en la siguiente imagen, que giran al mismo tiempo que el material avanza. La corriente eléctrica pasa por los puntos de contacto, generando calor debido a la resistencia del metal y formando así una unión continua o intermitente a lo largo de toda la línea de soldadura. (14)

Este método se caracteriza por ser rápido y eficiente, y por permitir formar uniones continuas o intermitentes, lo que lo hace ideal para fabricar recipientes herméticos o realizar uniones rápidas en materiales

delgados. Su fácil automatización lo convierte en una opción muy adecuada para la producción industrial en serie. Sin embargo, tiene algunas limitaciones: solo funciona con metales conductores, no es muy efectivo en piezas de gran espesor y requiere equipos especializados que pueden resultar costosos.

La soldadura por costura de resistencia se utiliza sobre todo en la fabricación de recipientes que necesitan ser estancos, como tanques de combustible y radiadores. También es común en la producción de tubos metálicos, carrocerías de automóviles y en la industria alimentaria, por ejemplo, en la elaboración de latas. (5)

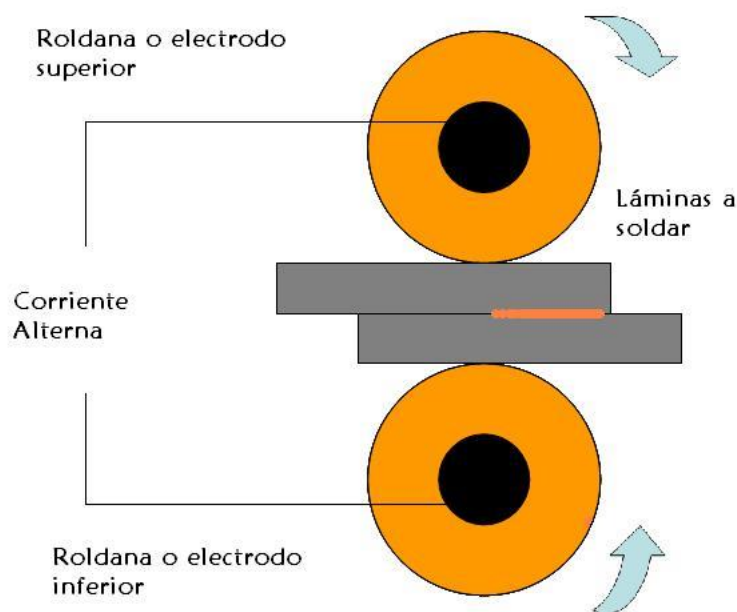


Ilustración 12 – Proceso de soldadura por costura de resistencia (RSEW). (26)

- Por proyección: La soldadura por proyección es un proceso que consiste en aplicar corriente eléctrica y presión en puntos concretos usando protuberancias previamente formadas en una de las piezas a unir. Estas proyecciones concentran el calor generado por la corriente, lo que provoca la fusión localizada del material y permite formar uniones precisas y resistentes. Al mismo tiempo, los electrodos planos ejercen presión uniforme, asegurando un control adecuado y una soldadura consistente.

Este método resulta muy eficiente cuando se necesitan realizar varias uniones simultáneamente o cuando las piezas tienen formas específicas y puntos de conexión definidos. Permite un control exacto

de la calidad y la ubicación de cada soldadura, lo que lo hace perfecto para aplicaciones repetitivas y automatizadas.

La soldadura por proyección se utiliza sobre todo en la industria automotriz para fijar tuercas, pernos y soportes metálicos. También es habitual en la fabricación de electrodomésticos y componentes electrónicos, donde se requiere unir piezas pequeñas y delicadas con gran precisión. (27)

- Por Chispa: En este proceso, las piezas que se quieren unir se colocan enfrentadas y se les hace pasar una corriente eléctrica de alta intensidad. La corriente provoca un calentamiento rápido en la zona de contacto, generando pequeñas chispas al producirse un cortocircuito inicial. Una vez que las superficies alcanzan la temperatura adecuada, se aplica presión para fusionarlas.

Este método permite obtener uniones muy resistentes sin necesidad de añadir material de aporte, lo que evita la contaminación de la soldadura. Es un proceso rápido, automatizable y especialmente indicado para producciones en serie. No obstante, el equipo necesario tiene un coste elevado, requiere mantenimiento, consume bastante energía eléctrica y solo se puede usar con materiales de formas regulares.

Su aplicación principal se encuentra en la unión de tubos, barras y chapas, como en la fabricación de componentes ferroviarios para unir raíles, en la industria automotriz y aeronáutica, y en la producción de electrodomésticos. (28)

- Por Recalcado: En este método, las piezas que se van a unir se colocan una frente a la otra y se presionan mientras se les hace pasar una corriente eléctrica que genera el calor suficiente para fundir las superficies de contacto. A diferencia de la soldadura por chispa, en la soldadura por recalcado no se producen chispas, porque el calor se distribuye de forma más uniforme y controlada. Cuando se alcanza la temperatura adecuada, se aplica presión y se logra una unión sólida y confiable entre las piezas.

Este procedimiento se utiliza sobre todo para unir barras, varillas, tubos o perfiles de secciones similares. Su principal ventaja es que produce

soldaduras limpias y fuertes, con mínima alteración estructural del material base. (29)

- Por alta frecuencia: Este procedimiento es una variante de la soldadura por resistencia que utiliza una corriente eléctrica de alta frecuencia, generalmente entre 100 y 500 kHz, para calentar los bordes de los materiales que se quieren unir. El calor se genera debido a la resistencia que el propio material ofrece al paso de la corriente. Una vez que se alcanza la temperatura adecuada, se aplica presión y las piezas se fusionan de manera sólida.

Entre sus principales ventajas se encuentran la rapidez y eficiencia del proceso, lo que lo hace muy útil en producciones industriales, la resistencia de las uniones y la posibilidad de trabajar con materiales finos sin que se deformen. Sin embargo, no es aplicable a todos los tipos de plásticos.

Se utiliza principalmente en la industria médica, para la fabricación de bolsas de sangre y otros fluidos intravenosos; en la industria automotriz, para tapicería, asientos o techos; en la industria textil y de productos inflables; y también en la producción de pancartas y láminas de vinilo, donde se necesita unir materiales de forma duradera y uniforme. (30)

Soldadura por Arco Eléctrico:

Se trata de un tipo de soldadura por fusión en el que el calor necesario para unir las piezas se genera mediante un arco eléctrico entre un electrodo y el material base. Este arco es básicamente una descarga de corriente que salta a través de un espacio en el circuito, alcanzando temperaturas muy altas capaces de fundir el metal y permitir que se unan las piezas. El electrodo puede actuar como material de aporte o simplemente conducir la corriente, dependiendo del método utilizado. Existen distintos tipos de soldadura por arco eléctrico, cada uno pensado para adaptarse a diferentes materiales, espesores y necesidades específicas: (5)

- Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW): Es un proceso manual en el que se genera un arco eléctrico entre un electrodo metálico revestido y la pieza que se quiere soldar. El arco produce el calor suficiente para fundir tanto el electrodo, que aporta material de relleno, como el metal base, formando un charco de metal líquido que,

al enfriarse, da lugar a una unión resistente. El revestimiento del electrodo cumple dos funciones principales: por un lado, genera gases que protegen el metal fundido de la oxidación, desplazando el oxígeno y el nitrógeno del aire; por otro, forma una escoria que cubre el cordón de soldadura mientras se enfría, mejorando sus propiedades mecánicas. (2)

Se trata de un método de soldadura muy versátil, económico y portátil, capaz de unir una gran variedad de materiales y espesores, incluso en espacios de difícil acceso o en condiciones desfavorables. Estas características lo han convertido en uno de los procesos más utilizados. No obstante, su ritmo de trabajo es relativamente lento, por lo que resulta menos eficiente frente a métodos automatizados de producción masiva. Suele emplearse en tareas de construcción, reparación y mantenimiento en sectores como la industria naval, petroquímica y automotriz.. (5)

En la ilustración a continuación se muestra el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW):

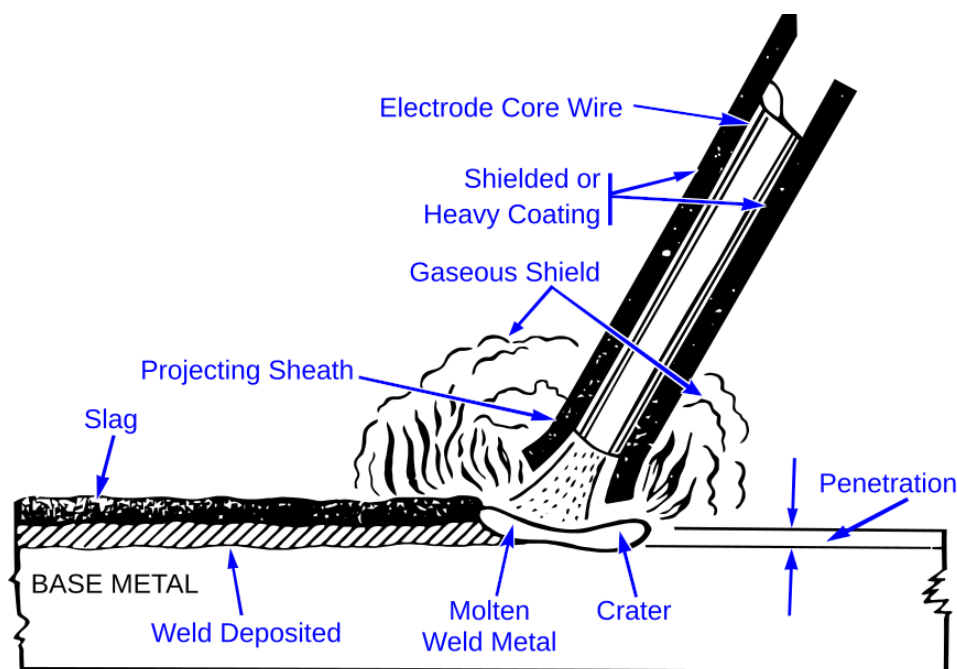


Ilustración 13 – Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). (31)

- Soldadura por arco sumergido (SAW): La soldadura bajo electroescoria, conocida por sus siglas en inglés como Submerged Arc Welding (SAW), es un proceso automatizado en el que un arco eléctrico se establece

entre un electrodo metálico continuo y el material base, generando el calor necesario para fundir ambos y formar la unión. Su característica principal es que tanto el arco como la zona de soldadura quedan completamente cubiertos por un flujo granular, que se funde parcialmente con el calor del arco y crea una escoria protectora. Esta cobertura protege la soldadura de la atmósfera, evitando la oxidación, y además disminuye las salpicaduras y la emisión de radiación ultravioleta. (4)

La soldadura por arco sumergido destaca por su elevada productividad y eficiencia, ya que permite depositar material rápidamente, logrando uniones de gran calidad y uniformidad. El flujo granular que cubre completamente el arco y la soldadura protege contra la oxidación y reduce las salpicaduras, lo que disminuye la porosidad y aumenta la durabilidad de la unión. Al tratarse de un proceso generalmente automatizado, la intervención del operador se minimiza, garantizando una mayor consistencia en el trabajo. No obstante, su aplicación se limita principalmente a posiciones horizontales y planas debido a las características del flujo granular y su método de aplicación.

Este proceso se emplea sobre todo en industrias pesadas, donde la combinación de rapidez y calidad es esencial. Es fundamental en la fabricación de tuberías y tanques para unir materiales de gran espesor, y en la construcción naval se utiliza para soldar cascos de barcos y otras estructuras de gran tamaño. También se aplica en la fabricación de estructuras metálicas como vigas, columnas y puentes, donde se requiere resistencia y fiabilidad en las uniones. Además, resulta indispensable en la industria de recipientes a presión, asegurando soldaduras homogéneas y resistentes capaces de soportar altas presiones y temperaturas. (2)

- Soldadura TIG (GTAW): La soldadura TIG (Tungsten Inert Gas), también conocida como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), es un proceso de soldadura por arco eléctrico que emplea un electrodo de tungsteno no consumible, aprovechando su punto de fusión extremadamente alto para fundir los materiales base sin que el electrodo se desgaste. Durante la operación, se utiliza un gas inerte, como argón o helio, que protege la zona de soldadura de la contaminación del aire, asegurando uniones precisas y de alta calidad.

En este método, el arco eléctrico se establece entre el electrodo de tungsteno y la pieza de trabajo. El calor generado funde el material base, y si se requiere, el operador puede añadir manualmente un metal de aporte. El gas protector fluye continuamente, creando una atmósfera inerte que evita la oxidación y la incorporación de impurezas. Al no consumirse el electrodo, el soldador tiene un control superior sobre la estabilidad del arco y la calidad de la soldadura.

La soldadura TIG es especialmente apreciada por su precisión y acabado limpio, ideal para materiales delgados o aplicaciones que exigen un alto nivel de detalle. Entre sus ventajas destacan la versatilidad para trabajar con distintos metales, la limpieza de la unión al no generar escoria, y la uniformidad de los cordones, lo que reduce la necesidad de posteriores trabajos de acabado. Como desventaja, se trata de un proceso más lento y requiere operadores con amplia experiencia debido a su complejidad.

En cuanto a aplicaciones, la TIG se emplea ampliamente en la industria aeroespacial para ensamblar componentes críticos donde la resistencia y la integridad estructural son esenciales. En la automotriz se utiliza para fabricar y reparar piezas específicas, como motores y sistemas de escape. También es frecuente en la industria alimentaria y farmacéutica para soldar aceros inoxidables en tanques y tuberías, garantizando superficies higiénicas. Además, se aplica en la fabricación de instrumentos médicos por su precisión y acabado limpio, y en joyería y arte, permitiendo trabajar con metales preciosos y aleaciones de manera detallada. (32)

En la ilustración a continuación se muestra diagrama de la soldadura TIG:



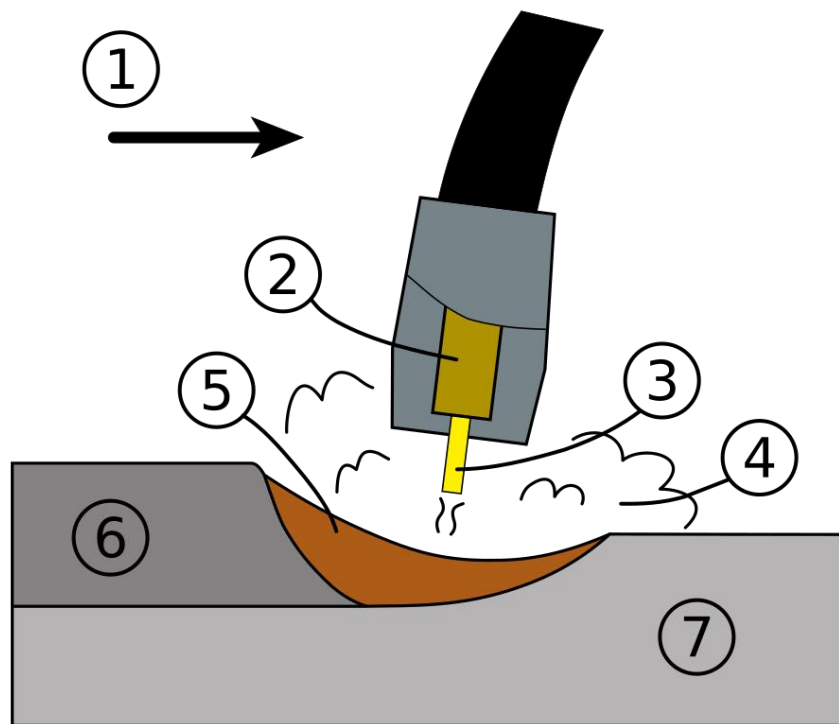
- Durante la soldadura, se emplea un gas protector para aislar la zona de la atmósfera y evitar la oxidación. En MIG, se utilizan gases inertes como argón, helio o mezclas de ambos, recomendados para materiales no ferrosos como aluminio y cobre, ya que no reaccionan con el metal y mantienen la calidad de la unión con un acabado más limpio y estable. En MAG, por otro lado, se utilizan gases activos como dióxido de carbono o mezclas de argón y CO_2 , más adecuados para aceros al carbono y aleaciones bajas; estos gases sí interactúan con el metal, mejorando la resistencia de la soldadura frente a impactos, corrosión y cambios de temperatura, aunque el acabado puede ser menos estético.

La GMAW destaca por su versatilidad, permitiendo trabajar con una amplia variedad de materiales y espesores. Ofrece alta eficiencia al reducir las interrupciones, lo que incrementa la velocidad de producción, y garantiza soldaduras de buena calidad gracias al control preciso del aporte de metal y la protección de la zona fundida. Además, su facilidad de uso hace que operadores con distintos niveles de

experiencia puedan aplicarla de manera efectiva. Aun así, tiene algunas limitaciones, como su sensibilidad a corrientes de aire que pueden comprometer la protección del gas y los mayores costos iniciales del equipo especializado.

Este método se utiliza principalmente en la fabricación de estructuras metálicas, recipientes a presión, maquinaria industrial y en la industria automotriz. También es frecuente en la construcción naval, debido a su capacidad para soldar materiales de distintos espesores y tipos, ofreciendo un equilibrio entre rapidez, eficiencia y calidad. (34)

A continuación, se muestra diagrama de la soldadura por arco eléctrico MIG/MAG (GMAW):



- 6. Dirección de avance
- 7. Tubo de contacto / guía del hilo del electrodo
- 8. Electrodo
- 9. Gas de protección
- 10. Metal de soldadura fundido
- 11. Metal de soldadura solidificado
- 12. Pieza de trabajo (material base)

Ilustración 15 – Soldadura por arco eléctrico MIG/MAG (GMAW) con pistola de soldadura.
(35)

- Soldadura por descarga de condensadores (CDW): La soldadura por descarga de condensador, por sus siglas en inglés Capacitor Discharge Welding (CDW), es un proceso que aprovecha la energía almacenada en un condensador para generar un arco eléctrico muy breve pero de gran intensidad.

El procedimiento comienza cargando un condensador hasta alcanzar el voltaje necesario. Una vez cargado, se libera la energía a través de un electrodo, produciendo un arco eléctrico de alta intensidad entre las piezas a unir. Este arco funde rápidamente las superficies de contacto, generalmente en milisegundos, tras lo cual se aplica presión para consolidar una unión sólida. Este método es especialmente útil para soldaduras rápidas y localizadas, con un impacto térmico mínimo sobre la estructura de las piezas.

Entre sus ventajas destacan la rapidez del proceso y la mínima zona afectada por el calor, lo que permite mantener las propiedades originales del material. También es adecuado para unir materiales distintos con diferentes puntos de fusión y conductividad, ofreciendo un control muy preciso sobre el aporte de calor. Sin embargo, el equipamiento es costoso y presenta limitaciones para piezas de gran tamaño.

Se utiliza principalmente en la industria electrónica para soldar pequeños componentes como conectores, en joyería, en el sector médico para la fabricación de instrumentos, así como en electrodomésticos y en la industria automotriz y aeroespacial para unir cableado, conexiones eléctricas, sensores y otros elementos delicados..
(36)

- Soldadura por arco de plasma (PAW): La soldadura por arco de plasma, por sus siglas en inglés Plasma Arc Welding (PAW), es un proceso que utiliza un arco eléctrico confinado para generar un plasma de alta temperatura capaz de fundir el material base. El arco se forma entre un electrodo de tungsteno no consumible y la pieza de trabajo. Lo que caracteriza al PAW es la presencia de una boquilla de precisión que concentra y comprime el arco, aumentando su densidad energética y estabilidad. Esto permite dirigir el calor de manera muy localizada, consiguiendo soldaduras de alta calidad y gran precisión. (37)

El plasma se produce cuando un gas, normalmente argón, helio o mezclas que pueden incluir nitrógeno o hidrógeno, atraviesa la boquilla y se ioniza por el intenso calor del arco eléctrico, transformándose en un flujo de plasma extremadamente caliente. Al mismo tiempo, un segundo gas protector envuelve la zona de soldadura, creando una atmósfera inerte que evita la oxidación del metal fundido. (38)

El proceso puede ejecutarse de dos maneras: en modo de arco transferido, donde el arco se establece directamente entre el electrodo y la pieza de trabajo, o en modo de arco no transferido, en el que el arco se mantiene entre el electrodo y la boquilla. Este segundo modo se emplea principalmente en aplicaciones especializadas, como corte de precisión o soldadura de componentes muy pequeños. (39)

La soldadura por arco de plasma se distingue por su gran precisión y su capacidad para unir tanto materiales delgados como gruesos, ofreciendo un control muy exacto del arco y una buena penetración del metal fundido. Esto permite obtener soldaduras uniformes y de acabado limpio, aunque el equipo es más complejo y costoso que otros procesos como TIG o MIG, y requiere operadores con alta capacitación para manejarlo y ajustar correctamente los parámetros.

Este método se aplica principalmente en sectores donde la precisión y la calidad son críticas, como la industria aeroespacial, automotriz, naval y en la fabricación de componentes electrónicos. También es frecuente en la soldadura de recipientes a presión, tuberías de acero inoxidable y aleaciones resistentes a la corrosión. (38)

1.1.3. Soldadura por Haces de Alta Energía:

La soldadura por Haces de alta energía es un proceso que utiliza haces concentrados de energía, para generar el calor necesario para fundir el metal y unir las piezas metálicas. Este calor puede ser producido por un haz láser, o por un haz de electrones:

Soldadura Láser (LBW):

La soldadura láser es un proceso que utiliza un haz de luz altamente concentrado para fundir y unir metales. La energía del láser se enfoca en un área muy pequeña, lo que permite realizar soldaduras profundas y precisas con mínima zona afectada por el calor. Este método es especialmente útil en materiales delgados y en aplicaciones que exigen rapidez y exactitud, aunque el equipo y la instalación son costosos y su eficacia depende de que los materiales tengan buena capacidad de absorción del láser. (14)

Entre sus aplicaciones más comunes se encuentran la industria automotriz, para el ensamblaje de chasis y componentes de carrocería; la aeroespacial, en la fabricación de piezas de alta precisión; y la electrónica, para unir componentes pequeños y delicados. También se emplea en la producción de equipos médicos y dispositivos quirúrgicos, donde la calidad y el acabado impecable son fundamentales. (40)

A continuación, se muestra imagen de la ejecución de soldadura láser:

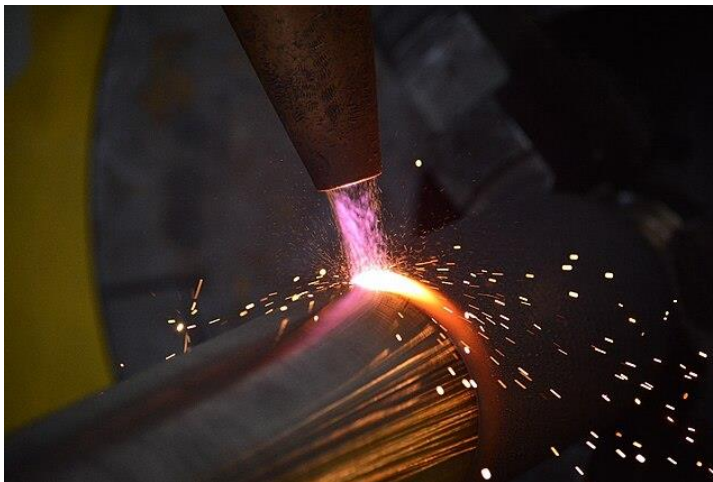


Ilustración 16 – Soldadura láser. (41)

Soldadura por Haz de Electrones (EBW):

Este método de soldadura por haces de alta energía utiliza un chorro de electrones de gran velocidad y energía cinética para fundir y unir los materiales. El haz se genera dentro de un entorno al vacío, lo que evita que los electrones se dispersen y permite concentrar la energía en un área muy reducida. Esto da lugar a soldaduras profundas y estrechas, con mínima distorsión térmica en las piezas. (14)

Este método resulta ideal para aplicaciones que requieren uniones extremadamente precisas y resistentes, especialmente en materiales gruesos o difíciles de soldar, como aleaciones especiales. Aunque su ejecución está limitada a entornos de vacío y el proceso es relativamente lento y costoso, se utiliza ampliamente en la industria aeroespacial para motores y componentes estructurales, en la automotriz para piezas críticas, en la industria nuclear y en la fabricación de herramientas de alta precisión. (5)

1.2 Soldadura sin Fusión (BONDING):

Los métodos de soldadura sin fusión son procesos en los cuales, las piezas metálicas se unen sin llegar a la fusión, ya sea mediante presión o mediante energía mecánica. Entre los procesos más importantes destacan la soldadura

por presión en caliente, soldadura por presión en frío, soldadura por fricción y soldadura por explosión:

Soldadura por presión en caliente:

El proceso de soldadura por presión en caliente consiste en aplicar simultáneamente calor y presión sobre los materiales a unir, sin llegar a fundirlos. El calor suaviza las superficies de contacto, mientras que la presión favorece la difusión atómica entre las piezas, logrando una unión sólida y continua a nivel microscópico.

Entre sus principales características destaca la capacidad de unir materiales iguales o distintos, incluyendo combinaciones que serían difíciles de lograr con técnicas convencionales. Este método genera uniones con menor probabilidad de defectos internos, como grietas o porosidad, y ofrece una alta resistencia mecánica sin necesidad de utilizar material de aporte. No obstante, su uso está limitado a ciertos materiales que toleran el calor aplicado, el proceso es lento y requiere equipos especializados para controlar con precisión la presión, la temperatura y el tiempo de aplicación.

Las aplicaciones más frecuentes se encuentran en la industria aeroespacial y automotriz, donde se emplea para fabricar componentes estructurales; en la industria electrónica, para unir semiconductores; y en la producción de herramientas de corte. (42)

Soldadura por presión en frío:

La soldadura por presión en frío es un proceso que une dos piezas aplicando únicamente presión, sin la necesidad de calor. Si las superficies de contacto están limpias y libres de óxidos, la presión aplicada acerca los átomos lo suficiente como para formar enlaces sólidos entre los materiales.

Este método es especialmente eficaz en metales y aleaciones como aluminio, cobre, plata, oro y algunos tipos de acero inoxidable. Entre sus ventajas destacan la eficiencia material y energética, al no requerir consumibles; la limpieza y resistencia de las uniones, al no fundir el material; y la capacidad de unir distintos tipos de materiales. Sin embargo, su efectividad depende de que las superficies estén extremadamente limpias y preparadas para facilitar la unión.

Se utiliza principalmente en la fabricación de productos eléctricos y electrónicos, como cables y conectores, en la joyería y en la industria aeroespacial, donde se requiere precisión y resistencia en las uniones. (43)

Soldadura por fricción:

La soldadura por fricción es un proceso que aprovecha el calor generado por el roce entre dos superficies metálicas para unirlos. Durante la operación, al menos una de las piezas se mueve —ya sea rotando, oscilando o de manera lineal— mientras se aplica presión para mantener el contacto. El calor producido por la fricción ablanda el material, permitiendo que, al detenerse el movimiento y mantenerse la presión durante el enfriamiento, se forme una unión sólida.

Este método produce conexiones de alta calidad, fuertes y libres de defectos típicos de los procesos de fusión, como grietas o porosidad. No requiere material de aporte, ya que el calor generado es suficiente para lograr la unión. Es aplicable a una amplia variedad de metales y aleaciones, lo que lo hace versátil y apto para distintos sectores. Además, es un proceso limpio, sin emisiones de gases ni salpicaduras, y se presta a la automatización industrial. Sus limitaciones incluyen restricciones en la geometría de las piezas y la necesidad de equipos especializados, que suelen ser costosos.

La soldadura por fricción se utiliza principalmente en la industria automotriz (ejes de transmisión y componentes de motor), aeroespacial (unión de turbinas y piezas críticas) y ferroviaria (ensamble de ruedas y ejes). También tiene aplicaciones en la fabricación de herramientas y componentes eléctricos. (44)

En la ilustración que se muestra a continuación se puede apreciar la unión por soldadura por fricción:

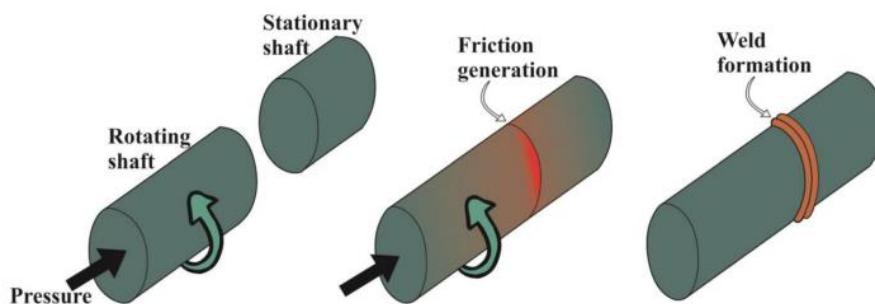


Ilustración 17 – Unión por soldadura por fricción. (44)

Soldadura por explosión:

La soldadura explosiva es un proceso de unión que utiliza la energía liberada por una explosión controlada para presionar y fusionar dos materiales. En este método, una de las piezas, denominada placa volante, se impulsa a gran velocidad contra la otra, llamada placa base. La colisión, cuidadosamente calculada, genera una fuerza tan intensa que elimina impurezas de las superficies y logra una unión metalúrgica sólida sin necesidad de fundir los

materiales. En la ilustración a continuación se muestra un diagrama de este proceso.

Una de sus principales ventajas es la capacidad de unir materiales con propiedades físicas y químicas muy diferentes, evitando problemas típicos de la fusión, como la formación de zonas frágiles. No obstante, este proceso requiere equipos especializados y estrictas medidas de seguridad debido al manejo de explosivos.

Se aplica principalmente en la fabricación de intercambiadores de calor, componentes aeroespaciales, tanques de presión con recubrimientos anticorrosión y placas bimetálicas diseñadas para estructuras específicas. (9)



Ilustración 18 – Preparación para proceso de soldadura por explosión. (45)

2. Soldadura Fuerte (BRAZING)

La soldadura fuerte es un método en el que se unen dos piezas metálicas mediante un metal de aporte cuyo punto de fusión es más bajo que el de los materiales base, pero superior a 450 °C. En este procedimiento, las piezas a unir no se funden; únicamente se calienta el metal de aporte, que fluye sobre la superficie de contacto y une las piezas al solidificarse.

Este tipo de soldadura destaca por su versatilidad, ya que permite unir materiales distintos y es apta para piezas de paredes delgadas que serían difíciles de soldar por fusión directa. La unión resultante es sólida y resistente, aunque generalmente no alcanza la misma fuerza que una soldadura que funde el metal base. (46)

La soldadura fuerte se emplea frecuentemente en la industria automotriz, especialmente para ensamblar tubos y tuberías. Además, se utiliza en la industria electrónica para unir conductores y cables, así como en la joyería artesanal, donde permite realizar uniones precisas y resistentes entre piezas metálicas finas. (47)

Para la realización de esta soldadura se utilizan diferentes métodos, entre los que destacan la soldadura con soplete, en horno, por inducción, por resistencia eléctrica, por relleno y por inmersión.

Soldadura con Soplete:

Este es uno de los métodos de soldadura más comunes. Consiste en aplicar un fundente sobre las superficies que se van a unir y calentar con un soplete que puede usar acetileno o propileno, mientras que el material de aporte se introduce en forma de alambre o varilla como se puede apreciar en la siguiente imagen. Generalmente se realiza de manera manual, por lo que requiere operarios capacitados. Este procedimiento se emplea habitualmente en reparaciones de componentes metálicos. (47)



Ilustración 19 – Proceso de soldadura con soplete. Fuente: Pixabay

Soldadura en Horno:

En este procedimiento, se emplea un horno comercial como fuente de calor para fundir el material de aporte. Es un método típico de producción a escala media o alta, donde los componentes se cargan en lotes dentro del horno. Se mantiene la temperatura requerida durante el tiempo necesario y, al finalizar, los materiales se dejan enfriar antes de retirarlos del horno. (47)

Soldadura por Inducción:

En este método, el calor se genera mediante una resistencia eléctrica que funciona como fuente de energía térmica. Se emplea una bobina de inducción capaz de manejar altas frecuencias de corriente alterna, dentro de la cual se colocan las piezas que se desean unir. (47)

A continuación, se muestra imagen del proceso de soldadura de inducción:

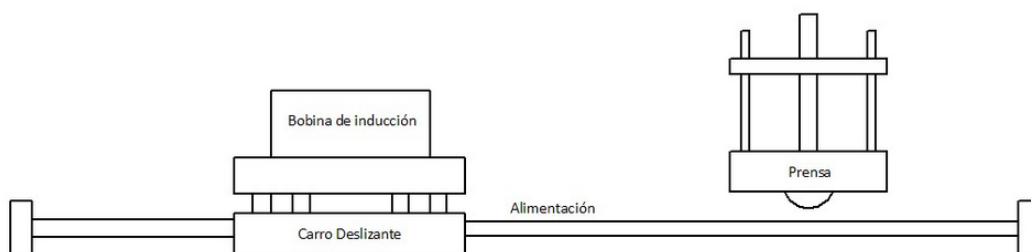


Ilustración 20 – Esquema de soldadura por inducción. (48)

Soldadura por Resistencia eléctrica:

En este proceso, se aplica una corriente eléctrica a través de las piezas que se quieren unir. La resistencia de los materiales al paso de la corriente genera calor, fundiendo el material de aporte colocado entre ellos. Al mismo tiempo, se ejerce presión mediante electrodos situados en los extremos, lo que permite que las piezas se fusionen y se forme una unión sólida. (47)

Soldadura por Relleno:

En este método, el metal de aporte se coloca ya fundido directamente en la unión entre las piezas, sin calentar previamente los materiales base. El metal líquido se desplaza por la ranura gracias a la acción capilar y, al solidificarse, crea la unión. Este procedimiento se emplea principalmente para reforzar conexiones existentes. (47)

Soldadura por Inmersión:

En este proceso, tal como indica su nombre, las piezas que se van a unir se sumergen en un baño de metal fundido. El metal líquido fluye hacia las juntas durante la inmersión y, al retirar las piezas del baño, se produce su solidificación, formando así la unión. (47)

3. Soldadura Blanda (SOLDERING)

La soldadura blanda es un método similar a la soldadura fuerte, ya que une dos piezas metálicas mediante un metal de aporte cuyo punto de fusión es inferior al de los materiales base. Sin embargo, a diferencia de la soldadura fuerte, el punto de fusión del metal de aporte en la soldadura blanda no debe superar los 450 °C. Durante el proceso, no se funden las piezas a unir; únicamente el metal de aporte se derrite y llena la superficie de contacto, formando la unión. El tipo de material de aporte puede variar según los metales a unir, siendo el estaño el más comúnmente utilizado. (46)

Entre sus principales ventajas se encuentra que no requiere temperaturas elevadas para realizarse y que ofrece gran versatilidad, permitiendo unir una amplia variedad de materiales. No obstante, también presenta algunas limitaciones: las piezas unidas no deben estar expuestas a altas temperaturas y el proceso puede generar residuos.

Este método se emplea ampliamente en la industria electrónica, especialmente en la fabricación de componentes como placas de circuitos impresos (PCBs). Además, se utiliza en instalaciones de agua, calefacción, sistemas de energía solar térmica y redes de gas a baja presión.

Dentro de la soldadura blanda encontramos 3 tipos dependiendo principalmente de la temperatura utilizada para soldar: (49)

Alta temperatura (350 °C - 450 °C):

En estas temperaturas se aplica en materiales con un punto de fusión más elevado, como pueden ser el cobre, bronce, latón o acero. Pudiendo utilizarse en situaciones donde se requiere mayor resistencia térmica y mecánica, como fontanería o calefacción. (49)

Media temperatura (200 °C – 350 °C):

En estas temperaturas se suelen utilizar metales como el níquel, aleaciones ligeras, oro y plata. En esta franja, la soldadura ofrece unión resistente pero sin comprometer las propiedades de los materiales. (49)

Baja temperatura (< 200 °C):

En estas temperaturas la soldadura suele fundir aleaciones que contienen plomo y estaño, ya que este tiene un punto de fusión bajo. Al realizarse a bajas temperaturas se minimizan las tensiones a las que se someten los metales base. Se utiliza principalmente para la producción de componentes electrónicos como placas de circuito impreso (PCBs) (49)

2.2 Historia de la soldadura

La historia de la soldadura se remonta a la Edad del Bronce y la Edad del Hierro, períodos en los que los artesanos combinaban calor y fuerza manual para unir metales. Un ejemplo son los egipcios, quienes aplicaban técnicas primitivas de forja para trabajar metales preciosos como el oro, creando joyas y utensilios metálicos mediante la unión de piezas calentadas.

En la India, un caso destacado de la metalurgia antigua es el Pilar de Delhi, construido entre los siglos IV y V d.C. Este imponente monumento de hierro forjado evidencia la habilidad en el trabajo de metales a gran escala y su sorprendente resistencia a la corrosión. Aunque no se empleaba soldadura moderna, el pilar refleja el avanzado conocimiento metalúrgico de la época.

Durante la Edad Media, la herrería experimentó un notable desarrollo. Los artesanos europeos comenzaron a fabricar herramientas y armas mediante la combinación de calor y martillado. La soldadura por forja, que consistía en calentar las piezas hasta volverlas maleables y luego unir las golpeándolas con el martillo, se convirtió en el método predominante, utilizándose ampliamente en la elaboración de espadas, armaduras y herramientas agrícolas. (50)

A finales del siglo XIX se descubrió por primera vez el principio básico de la soldadura por resistencia: generar calor mediante el paso de corriente eléctrica. Este hallazgo representó uno de los primeros avances hacia lo que posteriormente se consolidaría como la soldadura por resistencia.

No obstante, fue durante los primeros años del siglo XX cuando se establecieron los fundamentos de la soldadura por resistencia moderna, incluyendo variantes como la soldadura por puntos, por costura y por proyección. Elihu Thomson se destacó como pionero de este método, registrando patentes entre 1885 y 1900. La industria automotriz desempeñó un papel decisivo en su desarrollo y difusión, ya que requería técnicas rápidas, eficientes y automatizables para ensamblar las láminas de acero utilizadas en la fabricación de vehículos. (51)

A comienzos del siglo XX, en 1903, el químico alemán Hans Goldschmidt creó la soldadura aluminotérmica. Esta técnica se desarrolló originalmente para unir rieles de tren, proporcionando una solución resistente y eficaz que resultó especialmente útil para la industria ferroviaria. (17)

Durante el siglo XIX y con el auge de la Revolución Industrial, se empezaron a desarrollar métodos más avanzados para unir metales. Entre 1800 y 1802, los físicos Sir Humphry Davy y Vasily Petrov realizaron experimentos que demostraron cómo la corriente eléctrica podía generar un arco brillante y

estable entre dos electrodos. Aunque en ese momento no se aplicó esta idea a la soldadura, estos hallazgos sentaron las bases de lo que siglos después se conocería como soldadura por arco.

Los primeros avances prácticos en la soldadura por arco eléctrico surgieron a finales del siglo XIX. En 1881, el ingeniero francés Auguste de Méritens empleó un arco de carbono para unir piezas de plomo en la fabricación de baterías. Posteriormente, en 1887, los científicos rusos N. Benardos y Stanislav Olszewski desarrollaron y patentaron el método denominado "Electrogefest", considerado el primer uso efectivo del arco eléctrico para soldar metales, marcando un paso clave en la evolución de la soldadura.

Otro avance significativo fue la introducción de electrodos metálicos consumibles. En 1888, Nikolai Slavyanov, también ruso, diseñó un procedimiento en el que los electrodos metálicos no solo generaban el arco, sino que además se fundían para aportar material a la unión, mejorando de manera notable la calidad y eficiencia de las soldaduras. (51)

En 1893, el químico alemán Linde logró producir oxígeno en grandes cantidades mediante la licuefacción del aire, lo que abrió la puerta a su uso posterior en la soldadura oxiacetilénica. Al año siguiente, se registró la primera soldadura industrial empleando una llama oxhídrica. Finalmente, en 1895, el científico francés Le Chatelier llevó a cabo estudios sobre las aplicaciones industriales de este método, sentando las bases para su desarrollo posterior. (50)

Un hito importante en la evolución de la soldadura por arco tuvo lugar en 1904, cuando el ingeniero sueco Oscar Kjellberg presentó el electrodo revestido. Este electrodo contaba con un núcleo metálico cubierto por un revestimiento que, al fundirse, generaba un gas protector y una escoria, estabilizando el arco y protegiendo el metal fundido de la oxidación. Este desarrollo convirtió a la soldadura por arco en un proceso más confiable y eficiente, sentando las bases de la soldadura manual por arco con electrodo revestido (SMAW), que continúa siendo ampliamente utilizada hoy en día. (51)

En 1904, Oscar Kjellberg fundó la compañía ESAB, que se convertiría en una de las principales referentes mundiales en la producción de equipos y consumibles para corte y soldadura. La empresa se destacó por sus innovaciones tecnológicas y su fuerte impacto en la industria metalúrgica. (51)

En 1914, con el inicio de la Primera Guerra Mundial, la soldadura recibió un fuerte impulso debido a la necesidad de fabricar estructuras metálicas de manera rápida y eficiente. Esta demanda propició la aparición y crecimiento de empresas especializadas en el diseño y fabricación de equipos de soldadura. Un ejemplo destacado es Lincoln Electric, fundada en 1895 por John C. Lincoln,

que originalmente se dedicaba a la producción de motores eléctricos. Anticipándose a las necesidades bélicas, en 1912 la empresa comenzó a diversificar su actividad hacia los equipos y consumibles de soldadura, consolidándose como uno de los referentes en el sector. (2)

Durante la Primera Guerra Mundial, la soldadura por arco se reveló como una herramienta indispensable. Se utilizó para construir y mantener extensas redes ferroviarias que facilitaban el transporte de armamento, víveres y suministros, así como en la fabricación y reparación de barcos y componentes militares. Su eficacia y fiabilidad en estas condiciones extremas consolidaron su valor como tecnología crítica en tiempos de conflicto. (51)

A medida que la soldadura se desarrollaba y ganaba popularidad, se hizo evidente la necesidad de estandarizar los procesos y mejorar la seguridad. En 1919 se creó la American Welding Society (AWS), que, aunque al principio tuvo poca repercusión, llegó a ser influyente a mediados del siglo XX. La AWS desempeñó un papel clave en la creación de normativas y sistemas de certificación, elevando la calidad y la seguridad en la industria de la soldadura. (52)

Un hito importante en la evolución de la soldadura fue la invención de la soldadura por arco sumergido en 1935 por Lincoln Electric. Este proceso utiliza un flujo granular que cubre completamente el arco eléctrico, permitiendo realizar soldaduras profundas y de gran resistencia. Gracias a estas características, se convirtió en una técnica esencial para aplicaciones industriales pesadas, incluyendo la construcción naval, ferroviaria y de grandes infraestructuras. (50)

Durante las décadas siguientes, la soldadura por arco continuó su desarrollo. En los años 20 comenzaron a emplearse gases protectores para evitar la contaminación del metal fundido, lo que llevó en los años 40 a la creación de dos técnicas clave que transformaron la industria. En 1941, Russell Meredith inventó la soldadura TIG (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW), que utiliza un electrodo de tungsteno no consumible junto con un gas inerte como el argón para proteger la unión. Posteriormente, en 1948, surgió la soldadura MIG (Metal Inert Gas, GMAW), basada en un electrodo de alambre continuo protegido por gas inerte, y poco después se desarrolló la soldadura MAG (Metal Active Gas), que emplea gases activos como dióxido de carbono.

En 1957, el ingeniero estadounidense Robert M. Gage, trabajando para Hughes Aircraft Company, introdujo la soldadura por plasma. Su objetivo era lograr un método más preciso y controlado para cortar y unir metales en aplicaciones aeroespaciales. Este proceso se basa en un arco eléctrico concentrado que genera un chorro de plasma a temperaturas muy elevadas, permitiendo

soldaduras con gran exactitud y control, superiores a los métodos tradicionales. La invención se convirtió en un avance clave para la soldadura moderna y se adoptó rápidamente en la industria de la aviación y en sectores de alta precisión. (51)

En la década de 1960 se registró un avance notable con la introducción de la soldadura por fricción, inicialmente aplicada a gran escala para unir materiales como acero y aluminio sin necesidad de fundirlos. Durante este período, también surgieron otras técnicas como la soldadura por haz de electrones, la soldadura ultrasónica y la soldadura por arco sumergido (SAW).

Ese mismo periodo marcó el inicio del desarrollo de la soldadura láser tras la invención del láser en 1960. En 1965 comenzaron los primeros ensayos para explorar su capacidad de unir metales. Hacia 1970, se perfeccionó el uso del láser de CO₂ para aplicaciones industriales, y en la década de 1980, la disponibilidad de láseres de alta potencia permitió soldar materiales más gruesos con gran exactitud y eficiencia. (50)

En la actualidad, la soldadura sigue avanzando gracias a tecnologías como la inteligencia artificial y los sensores inteligentes, que buscan mejorar la calidad y la eficiencia de los procesos, especialmente en industrias como la automoción, la aeroespacial y la electrónica. (53)

3 DESARROLLO DEL TFG

Para entender el desarrollo y la influencia de la soldadura por arco eléctrico durante la Primera Guerra Mundial, es esencial que nos pongamos en el contexto histórico que llevó a este conflicto. A lo largo del siglo XIX y en los primeros años del XX, el mundo vivió cambios significativos que transformaron la producción y la tecnología a nivel global. Todos estos eventos sentaron las bases para el estallido de la Primera Guerra Mundial, un conflicto donde la industrialización y los avances tecnológicos jugaron un papel crucial en la manera en que se libró la guerra. En las próximas secciones, vamos a profundizar en cómo este contexto influyó en la evolución de la soldadura por arco eléctrico y su impacto en el conflicto.

3.1 Contexto histórico

A mediados del siglo XIX, Europa experimentaba cambios políticos significativos que transformaron el equilibrio de poder en el continente. Dos de los procesos más importantes de esta época fueron la unificación de Italia y Alemania, procesos que ocurrieron con circunstancias muy distintas, aunque con un agente común, el nacionalismo y que dieron lugar a dos nuevas potencias que tendrían un papel fundamental en la industrialización y en los conflictos del siglo XX. (54)

3.1.1 Unificación de Italia y Alemania y la modernización de Japón

Italia, hasta mediados del siglo XIX estaba dividida en numerosos reinos, ducados y estados, muchos de estos territorios estaban bajo la influencia de potencias extranjeras, como el Reino de las Dos Sicilias en el sur (bajo influencia española), los Estados Pontificios en el centro gobernados por la iglesia (con influencia de Francia) y el Reino de Cerdeña en el norte (Austria y Francia). También estaba el reino de Lombardía y el Véneto, dominado por el Imperio Austríaco. (55)

El proceso de unificación de Italia, conocido como el Risorgimento, fue liderado por el Reino de Piamonte-Cerdeña. Su rey, Víctor Manuel II, junto a su primer ministro, Camillo di Cavour, jugaron un papel crucial en la formación del estado italiano. Cavour, con su astuta diplomacia, logró alinear a Cerdeña con potencias como Francia y el Reino Unido, asegurando su apoyo para enfrentarse a Austria, que tenía el control del norte de Italia. En 1859, tras la Segunda Guerra de Independencia Italiana y con la ayuda de Napoleón III de Francia, Cerdeña logró arrebatar Lombardía a Austria, consolidándose como el líder del movimiento de unificación. (55)

A su vez, Giuseppe Garibaldi fue el líder que impulsó la unificación desde el sur. En 1860, Garibaldi logró conquistar el Reino de las Dos Sicilias, lo que facilitó la unión del sur de Italia con el Reino de Cerdeña. Luego, en 1861, Víctor Manuel II fue proclamado rey de Italia, aunque el país aún no estaba completamente unificado, ya que Venecia seguía bajo el control de Austria y los Estados Pontificios continuaban siendo gobernados por el Papa. (56)

A continuación, se muestra mapa con los reinos que existían previamente a la unificación de Italia y que se enfrentaron entre sí:



Ilustración 21 – Reinos Mapa de la unificación de Italia. (57)

En 1866, Italia se alió con Prusia en la Guerra Austro-Prusiana y, después de que Austria fuera derrotada, logró anexar Venecia. Por último, la unificación se completó en 1870, cuando a causa del enfrentamiento entre Prusia y Francia, esta última, abandonó su protección al Papa y las tropas italianas tomaron

Roma, poniendo fin al poder temporal pontífice y convirtiendo a la ciudad en la capital del nuevo reino en 1871. (55)

Por otro lado, en Alemania, la fragmentación política del Sacro Imperio Romano, Germánico a principios del siglo XIX, resultó en una combinación de estados independientes en Europa Central. (58)

A continuación se muestra mapa del proceso de unificación de Alemania 1815-1871:

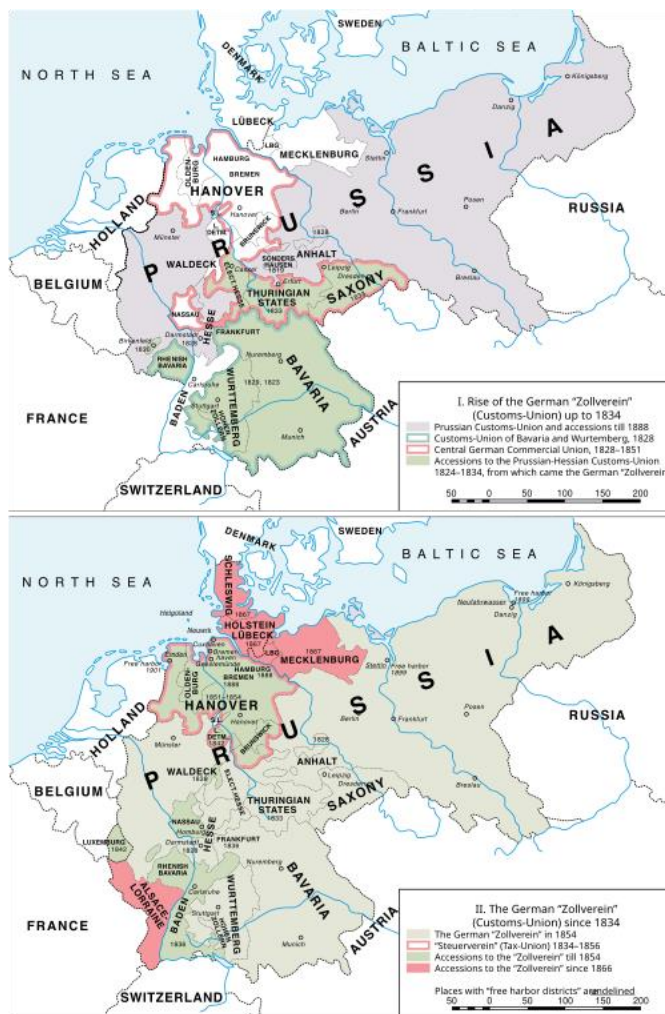


Ilustración 22 – Mapa de la unificación de Alemania, 1815 - 1871. (59)

La unificación de Alemania fue un proceso impulsado por el Reino de Prusia. En 1862, el rey prusiano, Guillermo I, nombró a Otto von Bismarck como su canciller, encargándole la misión de fortalecer la posición de Prusia en Alemania y consolidar su dominio. Bismarck, famoso por su enfoque de "sangre y hierro", sostenía que la unificación alemana no se lograría mediante discursos o votaciones, sino a través de la guerra y la fuerza militar. Con el apoyo de Guillermo I y del eficiente ejército prusiano, Bismarck llevó a cabo una serie de

conflictos estratégicos que debilitaron a los principales obstáculos para la unificación. (58)

El primer paso fue la guerra contra Dinamarca en 1864, donde Prusia, se alió con Austria, y se apoderaron de los ducados de Schleswig y Holstein. Posteriormente, en 1866, Prusia venció, gracias a su ejército, modernizado y con tecnología avanzada, a Austria en la Guerra Austro-Prusiana, excluyendo a los austriacos de los asuntos alemanes y estableciendo la Confederación de Alemania del Norte, bajo el dominio prusiano. (60)

El conflicto final y más decisivo fue la Guerra Franco-Prusiana de 1870-1871, en la que Prusia derrotó a Francia y capturó al emperador Napoleón III. Esta victoria avivó el sentimiento nacionalista alemán, y el 18 de enero de 1871, en la Galería de los Espejos del Palacio de Versalles, se proclamó el Imperio Alemán con Guillermo I de Prusia como emperador (Kaiser). Con esta unificación, Alemania emergió como una potencia industrial y militar, compitiendo con las principales naciones europeas y acelerando la modernización de la tecnología y la industria en el continente. (60)

También se produjeron grandes cambios políticos en países no europeos, como fue el caso de Japón, el cual, a finales del siglo XIX, inició una profunda transformación que acabaría con este país como una de las mayores potencias tecnológicas y militares del mundo, siendo esencial en la industrialización y con un papel importante en los conflictos acaecidos en el siglo XX. (61)

Japón, que hasta el año 1868 había permanecido aislado y bajo un sistema feudal, inició un intenso proceso de modernización. La Restauración Meiji de 1868 puso fin al gobierno del shogunato Tokugawa y devolvió el poder al emperador Meiji, quien se convirtió en el símbolo de una nueva era. La primera gran reforma fue la abolición del sistema feudal, dando paso a la creación de prefecturas administradas por el Gobierno central. (62)

La antigua clase samurái, que había dominado la sociedad durante siglos, perdió sus privilegios, lo que provocó revueltas como la Rebelión de Satsuma en 1877, liderada por los últimos defensores del antiguo orden. La derrota de los samuráis marcó el fin definitivo de la tradición guerrera y la consolidación de un ejército moderno. (62)

Se llevaron a cabo reformas económicas mediante la creación de una amplia red de ferrocarriles y fábricas, cuyos productos comenzaron a exportarse al abrirse al comercio internacional. Además, se implementó un sistema educativo moderno, inspirado en modelos occidentales, con el fin de preparar a los ciudadanos para la nueva sociedad. (62)

Las consecuencias de la Revolución Meiji fueron significativas. Japón se transformó de una sociedad agrícola y feudal a una nación industrializada con una economía competitiva. La modernización permitió al país fortalecer su ejército y mejorar su posición en el ámbito internacional, aunque también trajo consigo desigualdad social. El rápido avance tecnológico y económico dejó atrás a muchas clases tradicionales, generando tensiones entre la antigua aristocracia y la nueva élite industrial. A pesar de los desafíos, la Revolución Meiji posicionó a Japón como una de las potencias emergentes del mundo antes de que concluyera el siglo XIX. (62)

3.1.2 Estados Unidos y la guerra de Secesión (1861-1865)

Mientras en Europa se atravesaban cambios significativos con la unificación de Alemania e Italia, y Japón sufría un proceso de modernización impulsada por la Restauración Meiji, en Estados Unidos se gestaba un conflicto que marcaría el devenir de su historia, la Guerra de Secesión (1861-1865). A continuación, se procede a explorar las causas, el desarrollo y las consecuencias de este enfrentamiento.

A mediados del siglo XIX, Estados Unidos estaba marcado por profundas divisiones económicas, sociales y políticas. La tensión entre el norte industrializado y el sur agrícola se intensificaba, especialmente por la cuestión de la esclavitud. Mientras que los estados del norte luchaban por su abolición, el sur defendía el sistema esclavista como un pilar esencial de su economía. Estas tensiones culminaron en la Guerra de Secesión, un conflicto que cambiaría el rumbo del país y definiría su futuro como nación. (63)

El estallido de la guerra ocurrió en abril de 1861, después de que once estados del sur se separaran y formaran los Estados Confederados de América bajo el liderazgo de Jefferson Davis. El presidente Abraham Lincoln, un firme defensor de la Unión (la Unión representaba el gobierno nacional de Estados Unidos, encabezado por el presidente Abraham Lincoln, y abogaba por la continuidad del país como una sola nación indivisible), se negó a aceptar la independencia del sur y declaró la guerra para restaurar la unidad nacional. Durante cuatro años, se llevaron a cabo numerosas batallas que marcaron el rumbo del conflicto, como la Batalla de Gettysburg en 1863, que fue un punto de inflexión a favor del norte, y la Batalla de Antietam en 1862, recordada por ser el día más sangriento en la historia de Estados Unidos. Figuras como el general Ulysses S. Grant, al mando de las tropas de la Unión, y Robert E. Lee, comandante del ejército confederado, se convirtieron en protagonistas de esta contienda. (63)

En la imagen a continuación se puede ver el mapa con los estados según los bandos intervinientes en la guerra de secesión estadounidense:



Ilustración 23 – Mapa de los bandos de la guerra de Secesión estadounidense. (64)

La guerra terminó en abril de 1865 con la rendición de Lee en Appomattox Court House, lo que selló la victoria del norte. Este triunfo representó la victoria del modelo industrializado del norte contra el esclavista y agrario del sur. El norte era muy superior en términos de capacidad productiva y recursos tecnológicos. Su economía estaba basada en la industria, lo que permitía una gran producción de uniformes, armamento y suministros. También estaba mucho más desarrollado tecnológicamente, contando con mejores infraestructuras, especialmente en el ámbito ferroviario. (65)

En este aspecto, el ferrocarril supuso una herramienta fundamental durante el conflicto, ya que el norte con una red ferroviaria desarrollada podía transportar todo tipo de materiales y recursos de manera mucho más rápida y ágil que el sur, apoderándose del poder logístico del conflicto. El ferrocarril no solo permitió el desplazamiento de tropas y materiales, sino también la circulación de ideas, nuevas tecnologías e innovaciones entre territorios entre los que, dadas las dimensiones de Estados Unidos, podían encontrarse a una gran distancia los unos de los otros. Tras el conflicto y con el paso del tiempo, el ferrocarril tuvo un papel clave en la consolidación de Estados Unidos como nación, ya que, dada la extensión del país, conectaba regiones muy alejadas entre sí, favoreciendo el comercio entre los estados integrantes y difundiendo los avances tecnológicos. (66)

Las repercusiones fueron profundas. La esclavitud fue abolida gracias a la Enmienda XIII de la Constitución, pero las heridas sociales y económicas

continuaron durante décadas. El período de Reconstrucción (1865-1877) buscó integrar a los estados del sur y asegurar los derechos civiles de los afroamericanos, aunque la segregación racial y las desigualdades siguieron presentes. (65)

La Guerra de Secesión no solo fortaleció la unión del país, sino que también dio inicio a la transformación de Estados Unidos en una potencia industrial, al aumentar la producción masiva de armas, uniformes y suministros para el ejército, lo que benefició el crecimiento de las industrias siderúrgica, textil y ferroviaria. La utilización del ferrocarril y el telégrafo modernizó la logística militar, mientras que la fabricación mecanizada estableció las bases del capitalismo industrial. Además, el conflicto promovió la creación de un ejército moderno con armamento más avanzado, barcos acorazados y mejores servicios médicos. Después de la guerra, la rápida industrialización transformó a Estados Unidos en una potencia económica, consolidando un modelo basado en la industria y el trabajo asalariado. (67)

3.1.3 La Segunda Revolución Industrial (1870-1914)

A finales del siglo XIX y principios del XX, el mundo vivía una transformación profunda impulsada por la Segunda Revolución Industrial, un período marcado por avances tecnológicos y científicos que cambiaron la producción y la vida cotidiana. Esta transformación surge como consecuencia de los cambios políticos que lo precedieron y facilitaron, las unificaciones de Italia y Alemania, la modernización de Japón con la restauración Meiji y la victoria del norte industrializado en la Guerra de Secesión de los Estados Unidos. Estos cambios no solo se limitaron al ámbito político y geográfico, también definieron nuevos modelos tanto económicos como institucionales que buscaban el desarrollo industrial y tecnológico. (68)

En el caso de Alemania, surgió como una potencia mundial unificada que realizaba una gran inversión en investigación científica para su aplicación industrial, esto desencadenó en un crecimiento importante en sectores como la ingeniería eléctrica, la química y la óptica. Japón que había abandonado el aislamiento y el sistema feudal en el que se encontraba, tras su modernización, adoptó modelos industriales europeos, que, en pocas décadas, le permitieron desarrollarse industrialmente, construyendo fábricas y astilleros, y desarrollando la industria del ferrocarril. Por otro lado, Estados Unidos, gracias a la victoria del norte industrializado contra el sur agrícola en la Guerra de Secesión, aceleró la industrialización del país, con la expansión del ferrocarril, la producción mecanizada y el uso de metales como el acero. (68)

De este modo, la Segunda Revolución Industrial fue el resultado directo de estos cambios políticos, económicos y sociales que se produjeron desde

mediados del Siglo XIX. Estos procesos dieron lugar a la formación de los estados modernos, potenciaron la expansión de los mercados y sentaron las bases para las importantes innovaciones que se produjeron en los años siguientes en áreas como la electricidad, comunicaciones, transporte y otras tecnologías como la soldadura. (68)

La aparición de nuevas fuentes de energía, como la electricidad, junto con innovaciones en la industria del acero y el transporte, dio paso a una era de grandes cambios. En este contexto de crecimiento industrial, avances en ingeniería y la expansión de nuevas tecnologías, surgieron métodos innovadores en diversos campos, incluida la soldadura por arco eléctrico. Estos avances revolucionaron las técnicas de unión de metales, no solo cumpliendo las demandas de una economía industrializada, sino también desempeñando un papel crucial en los conflictos y desarrollos tecnológicos de la época, como la Primera y la Segunda Guerra Mundial. (54)

La Segunda Revolución Industrial, que se desarrolló entre 1870 y 1914, marcó un cambio radical en la economía, la sociedad y la tecnología. A diferencia de la Primera Revolución Industrial, que se basó en el carbón, el vapor y la mecanización temprana de la producción, esta segunda etapa se distinguió por la adopción de nuevas fuentes de energía como la electricidad y el petróleo, el avance de la industria química y del acero, y la introducción de métodos de producción en masa. (69)

Este proceso no se limitó a un solo país, sino que se extendió por diversas regiones del mundo, teniendo un impacto notable en Estados Unidos, Japón y Europa occidental en países como Alemania, Reino Unido, Francia y Bélgica. A diferencia de la Primera Revolución Industrial, donde Gran Bretaña fue la potencia dominante, en esta ocasión emergieron nuevos competidores en la industria, especialmente Alemania y Estados Unidos, que lograron superar a los británicos en muchos sectores clave. (70)

El contexto histórico de la Segunda Revolución Industrial estuvo caracterizado por una transformación significativa del sistema económico global. Con el crecimiento del capitalismo y la expansión de los mercados, las principales potencias europeas y Estados Unidos consolidaron su influencia en el mundo a través del imperialismo, controlando extensos territorios en África, Asia y América Latina para acceder a materias primas y nuevos mercados. La rápida industrialización y la modernización de los sistemas de transporte, gracias a la construcción masiva de ferrocarriles y barcos de vapor, facilitaron la producción en grandes cantidades y la distribución global de bienes. (54)

Se llevaron a cabo importantes innovaciones tecnológicas que cambiarían el rumbo de la industria, provocando una profunda modernización en los

procesos de producción y en la estructura económica. Uno de los aspectos más revolucionarios de este período fue la llegada de la electricidad como nueva fuente de energía. Se fundó General Electric Corporation, la primera empresa mundial de electricidad. En 1879, Thomas Edison patentó la bombilla eléctrica, lo que permitió iluminar hogares y fábricas sin depender de lámparas de gas o velas. (54)

Este invento, junto con el desarrollo de las redes eléctricas urbanas en la década de 1880, transformó la producción industrial y la vida en las ciudades. Sin embargo, Edison promovía la corriente continua (DC), mientras que Nikola Tesla y George Westinghouse, a finales de la década de 1880 y principios de 1890, abogaron por la corriente alterna (AC), que finalmente se impuso por ser más eficiente en la transmisión a larga distancia. (71)

El petróleo se convirtió en un recurso fundamental. Aunque su existencia era conocida, fue en 1859 cuando Edwin Drake perforó el primer pozo de petróleo en Pensilvania, dando inicio a la era del petróleo como recurso esencial. Este avance se unió a la invención del motor de combustión interna: en 1876, Nikolaus Otto desarrolló el primer motor de cuatro tiempos, y en 1885, G. Daimler patentó el motor a gasolina, el cual un año más tarde, Karl Benz utilizaría para crear el primer automóvil funcional, lo que marcó el comienzo de la industria automotriz. Posteriormente, a finales del siglo XIX, se produjo otro gran avance gracias a Rudolf Diesel, quien patentó en 1892 el motor diésel. Este motor de combustión interna era más eficiente y aprovechaba mejor el combustible, lo que facilitó su uso en maquinaria pesada, navegación y transporte terrestre. A principios del siglo XX, Henry Ford revolucionó el sector en 1908 con la introducción del modelo T y la producción en cadena, lo que permitió reducir costos y hacer que los automóviles fueran accesibles para las masas. (54)

La industria del acero experimentó una transformación significativa con la invención del proceso Bessemer en 1856, creado por Henry Bessemer. Este método permitió la producción de acero a bajo costo y en grandes volúmenes. Como resultado, se facilitó la construcción de puentes, rascacielos, barcos y ferrocarriles, lo que a su vez favoreció el crecimiento urbano y la globalización del comercio. En 1889, la Torre Eiffel se erigió utilizando este material, lo que evidenció su gran potencial arquitectónico. (72)

El proceso Bessemer consiste en transformar hierro fundido en acero mediante la eliminación de impurezas. Se inyecta aire a presión en un convertidor que contiene hierro fundido como el mostrado en la ilustración a continuación. El oxígeno presente en el aire reacciona con el carbono y otras impurezas, provocando su combustión y aumentando la temperatura, lo que purifica el metal y lo convierte en acero de manera rápida y económica. (72)

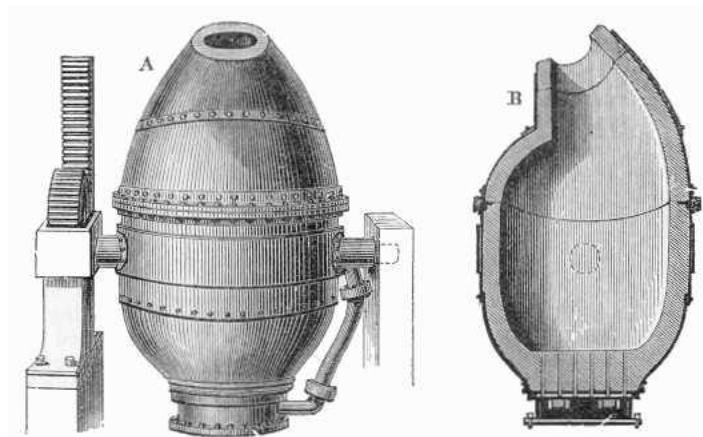


Ilustración 24 – Plano del convertidor de Bessemer. (73)

El desarrollo del transporte y las comunicaciones fue un aspecto fundamental de la Segunda Revolución Industrial. Se produjo la expansión y mejora de los ferrocarriles, que se establecieron como el principal medio de transporte terrestre. La incorporación del acero en la construcción de las vías férreas permitió crear una infraestructura más robusta y duradera, mientras que las locomotoras de vapor aumentaban su potencia y eficiencia. En 1869, se finalizó el ferrocarril transcontinental en Estados Unidos, uniendo la costa este con la costa oeste y facilitando el comercio a gran escala. (54)

Por otro lado, los barcos de acero transformaron el transporte marítimo. Anteriormente, los barcos se construían principalmente de madera o hierro, pero con la aparición del proceso Bessemer y la consecuente reducción de costos del acero, se empezaron a fabricar embarcaciones mucho más grandes, duraderas y seguras. Estos barcos se convirtieron en la columna vertebral del transporte transoceánico de mercancías y pasajeros, impulsando la expansión del comercio global y el imperialismo europeo. (70)

La aviación, que llevaba décadas desarrollándose, apareció finalmente y de manera controlada, a principio del siglo XX, siendo una de las innovaciones más importantes de este periodo. En el año 1903, los hermanos Wright, en Carolina del Norte, Estados Unidos, realizaron el primer vuelo controlado de un avión a motor, dando comienzo a la era de la aviación. Desde ese momento, los avances en este sector se sucedieron con rapidez. Inicialmente, los aviones eran de madera, telas y alambres, materiales que pese a ser ligeros, eran bastante frágiles. Sin embargo, la aviación suponía un potencial tanto militar como comercial muy importante, lo que impulsó la rápida aparición de nuevas tecnologías. Durante la Primera Guerra Mundial (1914-1919) los aviones dieron un paso adelante, pasando de utilizarse simplemente para reconocimiento aéreo, a cumplir roles de combate, bombardeo y apoyo aéreo. Este potencial hizo que se invirtiese en avances y desarrollos tanto en su

diseño, como en la aerodinámica y estructuras más resistentes. Entonces, se comenzaron a introducir fuselajes metálicos en su estructura y técnicas de fabricación más sólidas, como la soldadura. (74) Modelos como Junkers J1 (Alemania, 1915), considerado el primer avión metálico en su totalidad, marcaron un hito en la evolución de la aviación, anticipando los numerosos avances que se sucedieron en las décadas siguientes. Posteriormente, el modelo Junkers JI (1917), que se puede ver en la ilustración a continuación, fue uno de los primeros aviones en producirse en masa. (75)



Ilustración 25 – Imagen del modelo alemán Junkers J1, primer avión metálico. (76)

Todos estos avances revolucionaron por completo la forma de moverse por el mundo, pero también impulsaron una urgente demanda de métodos de unión de estructuras metálicas más eficientes y resistentes que las existentes hasta ese momento. En el siglo XIX y las décadas previas, las formas más habituales de unión eran el remachado y la soldadura por forja, pero con la aparición de las estructuras metálicas en los aviones y en los barcos, así como el desarrollo de los ferrocarriles, surgió la necesidad de nuevas soluciones más rápidas y resistentes. Los trenes comenzaron a incorporar en las vías y locomotoras, a principios del siglo XX, nuevos métodos de soldadura como la soldadura de gas oxiacetilénica y la soldadura eléctrica. (77)

Los desarrollos de la soldadura por arco, que llevaron a la introducción industrial de la soldadura por arco eléctrico a partir de 1910, provocaron una adopción progresiva en la industria naval. Durante la Primera Guerra Mundial se fabricaron los primeros barcos con cascos totalmente soldados por esta metodología como el Fullagar en Reino Unido. Adicionalmente, también se utilizó esta soldadura para realizar rápidas reparaciones en buques dañados, impulsando el reconocimiento técnico de este método. (78)

En la aviación, como se ha mencionado con anterioridad, las primeras aeronaves estaban formadas principalmente por madera. Durante la Primera Guerra Mundial se fueron introduciendo los fuselajes metálicos en la estructura de los aviones, utilizando la soldadura para su unión, principalmente en cazas alemanes como el Junkers J1, primer avión totalmente metálico o sus

sucesores como el Junkers J2 o el Junkers J1 que consolidaron esta tendencia. (75)

Por tanto, el desarrollo de los medios de transporte (ferrocarriles, barcos y aviones) y la soldadura se volvieron procesos interdependientes entre sí. Comenzó a introducirse la soldadura por arco eléctrico para vehículos y estructuras más grandes, ya que superaba en rapidez, resistencia y economía a los otros métodos, convirtiéndose en un pilar fundamental para la producción industrial del siglo XX.

En cuanto a la comunicación, destacó el auge y expansión del telégrafo, que, aunque ya había sido parcialmente desarrollado antes de este período, fue en este periodo cuando se popularizó. Inventado por Samuel Morse en 1837, se convirtió en un medio esencial para la comunicación a larga distancia. Gracias al código Morse, los mensajes podían enviarse rápidamente a través de cables, lo que permitió una comunicación casi instantánea entre continentes y países, acelerando el comercio y las relaciones internacionales. La telecomunicación mediante líneas telegráficas se expandió rápidamente, conectando grandes distancias y ayudando a reducir la demora en las comunicaciones, especialmente para el gobierno y los negocios internacionales. (79)

En 1876, Alexander Graham Bell patentó el teléfono, ver imagen de la patente en la ilustración a continuación, un invento que transformó la forma en que se transmitía la voz a través de un cable eléctrico. Esto facilitó la comunicación en tiempo real, incluso a largas distancias. Aunque al principio su uso era bastante limitado, pronto se volvió popular en las ciudades y entre las empresas. (70)

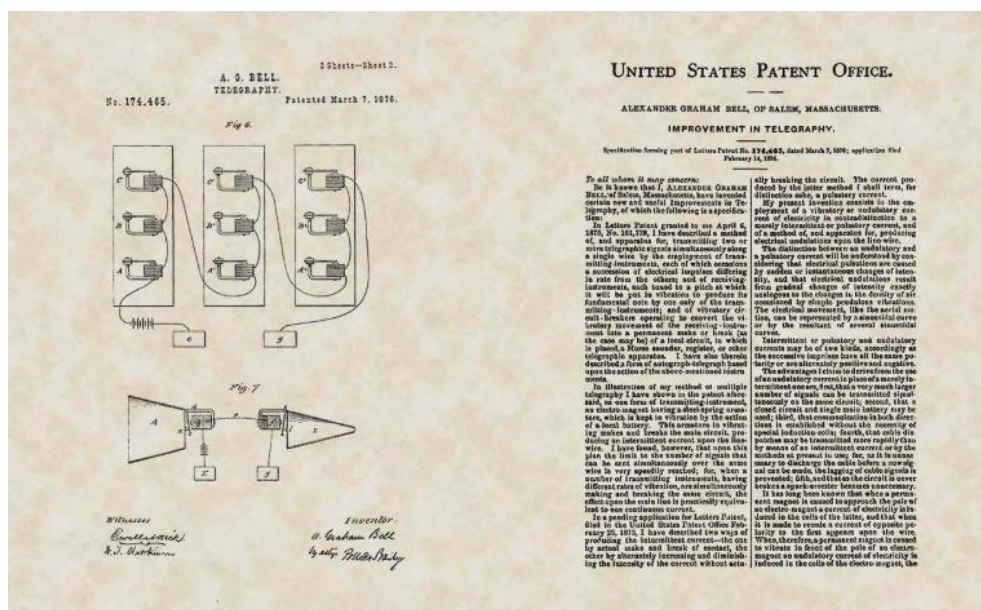


Ilustración 26 – Patente de Alexander Graham Bell. Máquina de telegrafía mejorada. (80)

Todos estos cambios y avances tecnológicos tuvieron un impacto significativo en la sociedad. La producción en masa y la mecanización de la industria crearon una mayor demanda de mano de obra en las ciudades, lo que provocó la expansión urbana y un rápido crecimiento de la población. Sin embargo, las condiciones laborales eran muy desfavorables: largas jornadas, salarios bajos y un aumento del desempleo debido a la sustitución de trabajadores por máquinas. Esto llevó al surgimiento de sindicatos, y en muchos países comenzaron a formarse movimientos obreros socialistas. (70)

Por otro lado, la intensa competencia entre las naciones industrializadas por recursos y mercados impulsó la expansión colonial, un fenómeno conocido como el Imperialismo. Europa, Estados Unidos y Japón se repartieron el mundo en busca de materias primas y mercados para sus productos industriales. Alemania, que se unificó en 1871, emergió como una de las principales potencias industriales y comenzó a desafiar la supremacía británica. Japón, tras la Restauración Meiji en 1868, adoptó las tecnologías occidentales y se convirtió en la primera nación asiática en industrializarse a gran escala, logrando una notable modernización en pocas décadas. (54)

Las tensiones entre las potencias aumentaron a medida que se industrializaban y competían por el control del comercio mundial. En 1898, Estados Unidos se estableció como una potencia internacional al vencer a España en la Guerra Hispanoamericana, lo que le permitió obtener colonias como Filipinas, Puerto Rico y Guam. En 1905, Japón sorprendió al mundo al derrotar a Rusia en la Guerra Ruso-Japonesa, demostrando que un país no europeo podía competir militarmente con las potencias occidentales. (81)

Todo este contexto de crecimiento económico, expansión colonial y competencia industrial generó una serie de alianzas y rivalidades entre las naciones más poderosas. Para 1914, las tensiones habían llegado a su punto más alto, lo que desencadenó en el estallido de la Primera Guerra Mundial. Este conflicto marcaría el final de la Segunda Revolución Industrial y el comienzo de una nueva etapa en la historia mundial. (81)

En resumen, la Segunda Revolución Industrial cambió el mundo de manera irreversible. Transformó la producción de bienes, la forma de trabajar, la vida en las ciudades y la competencia entre naciones. Fue un periodo de importantes avances tecnológicos y científicos, pero también de marcadas desigualdades y conflictos. Su legado perdura en la actualidad, ya que estableció las bases de la sociedad industrial moderna y de la globalización económica. (81)

3.1.4 La Primera Guerra Mundial (1914-1919)

El desarrollo industrial y tecnológico que tuvo lugar en la segunda mitad del siglo XIX transformó de manera profunda las sociedades europeas y las relaciones internacionales. La industrialización no solo impulsó el crecimiento económico, sino que también generó una creciente competencia entre las potencias por el control de mercados, materias primas y territorios coloniales. Esta tensión, combinada con las rivalidades políticas y las ambiciones expansionistas, creó un panorama inestable que finalmente conduciría al estallido de la Primera Guerra Mundial. (81)

En este contexto, Europa vivió un periodo conocido como la Paz Armada, caracterizado por una aparente estabilidad que se sostenía en un débil equilibrio de poder. Sin embargo, este equilibrio ocultaba una creciente militarización y una tensión latente entre las grandes potencias. A pesar de que no hubo conflictos directos entre los principales estados europeos, la acumulación de armamento, el aumento y modernización de los ejércitos y la incorporación de nuevas tecnologías armamentísticas señalaban que la paz era solo una tregua temporal. La desconfianza entre las naciones fomentó la creación de alianzas militares que dividieron al continente en dos bloques opuestos. (82)

La unificación de Alemania en 1871 cambió radicalmente el equilibrio de poder en Europa. Convertida en una potencia industrial y militar de primer nivel, Alemania buscaba consolidar su hegemonía, lo que generó inquietud entre sus vecinos. Francia, que había sido derrotada en la Guerra Franco-Prusiana (1870-1871), percibió la expansión alemana como una amenaza directa y comenzó a buscar aliados que pudieran hacerle frente. Por otro lado, el Imperio Austrohúngaro, preocupado por los movimientos nacionalistas en los Balcanes y la creciente influencia de Rusia en la región, vio en Alemania un socio estratégico con el que compartir sus intereses. (83)

En 1882, Alemania, Austria-Hungría e Italia firmaron la Triple Alianza, un acuerdo defensivo destinado a fortalecer su posición frente a Francia y Rusia. Italia, aunque inicialmente enemistada con Austria-Hungría por disputas territoriales en el norte de la península itálica, decidió unirse a la coalición para asegurar su lugar en el escenario internacional. Sin embargo, su adhesión a la alianza no fue firme, y con el tiempo buscaría acuerdos paralelos con otras potencias. (83)

Ante esta amenaza, Francia encontró en Rusia un aliado natural, dado que ambos compartían un enemigo común en Alemania. En 1892, se formalizó la Alianza Franco-Rusa, un pacto militar que aseguraba apoyo mutuo en caso de agresión. Posteriormente, en 1904, Francia y el Reino Unido resolvieron sus

disputas coloniales a través de la “Entente Cordiale”, un acuerdo que, si bien no implicaba una alianza militar formal, sentó las bases para una futura cooperación. Finalmente, en 1907, el Reino Unido y Rusia firmaron un acuerdo similar, consolidando la Triple Entente, el bloque que se enfrentaría a la Triple Alianza en la inminente guerra. (82)

A continuación, se muestran los sistemas de alianzas formadas en la Primera Guerra Mundial:



Ilustración 27 – Sistemas de alianzas en 1907. (84)

La situación internacional se volvió cada vez más tensa. Alemania, tras su unificación en 1871, había emergido como una potencia industrial y militar, desafiando la supremacía del Reino Unido y de Francia. La competencia colonial, especialmente en África y Asia, también había agudizado las rivalidades entre las potencias europeas. Al mismo tiempo, el Imperio Austrohúngaro enfrentaba movimientos nacionalistas dentro de sus fronteras, mientras que Rusia buscaba expandir su influencia en los Balcanes, apoyando a Serbia. (82)

El Imperio Austrohúngaro, que surgió del Compromiso de 1867 y estableció una monarquía dual entre Austria y Hungría, se distinguía por su notable diversidad étnica y cultural, lo que generaba conflictos internos de manera constante. En su extenso territorio convivían numerosos grupos, como alemanes, húngaros,

checos, eslovacos, croatas, serbios, rumanos, polacos, ucranianos e italianos. Sin embargo, solo las élites germano-austriacas y húngaras ejercían el poder político y económico, mientras que muchas de las otras nacionalidades se sentían excluidas y luchaban por obtener mayor autonomía o independencia. (83)

A lo largo del siglo XIX y principios del XX, los movimientos nacionalistas cobraron gran fuerza. Entre ellos, los eslavos del sur (serbios, croatas y bosnios) buscaban unificar a todos los pueblos eslavos en un solo Estado, con el respaldo de Serbia, que se había consolidado como un pequeño pero influyente reino independiente tras las Guerras Balcánicas (1912-1913). El crecimiento de Serbia, tanto en territorio como en poder militar, aumentaba la preocupación de Viena por el temor a que los serbios fomentaran el nacionalismo entre los eslavos del sur dentro de sus fronteras. La ambición serbia de crear una Gran Serbia, que uniera a todos los eslavos del sur, representaba una amenaza directa al dominio austrohúngaro, especialmente sobre Bosnia-Herzegovina y otras áreas con una significativa población eslava. (83)

El detonante de la crisis llegó el 28 de junio de 1914, cuando el archiduque Francisco Fernando, heredero al trono austrohúngaro, fue asesinado en Sarajevo por un nacionalista serbobosnio. Bosnia-Herzegovina, anexionada por Austria-Hungría en 1908, era una región con gran presencia serbia, y el atentado reflejaba el profundo descontento de los nacionalistas eslavos. El asesinato fue interpretado por el gobierno austrohúngaro como una provocación directa de Serbia. (83)

En la siguiente imagen se muestra el mapa de Europa en 1914:

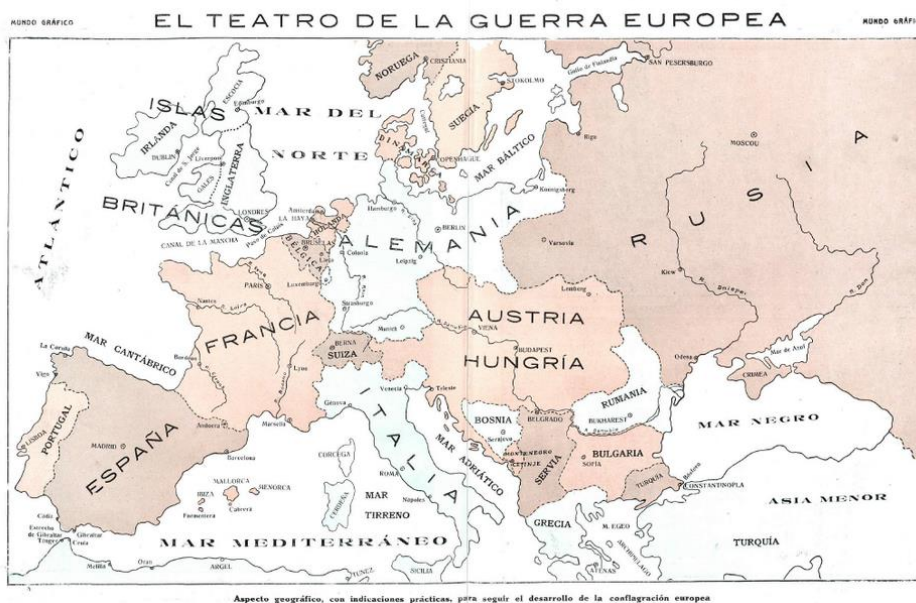


Ilustración 28 – Mapa de Europa en 1914. (85)

Con el apoyo de Alemania, Austria-Hungría envió un ultimátum a Serbia el 23 de julio de 1914 con condiciones muy estrictas, cuyo cumplimiento total habría implicado una pérdida de soberanía para Serbia. Aunque el gobierno serbio aceptó la mayoría de las exigencias, la respuesta fue considerada insuficiente por Viena. El 28 de julio de 1914, Austria-Hungría declaró la guerra a Serbia, desencadenando una reacción en cadena que llevó al estallido de la Primera Guerra Mundial, involucrando a las principales potencias europeas en un conflicto que marcaría el destino del siglo XX. (86)

En este contexto, Rusia, aliada de los serbios y con interés comercial en los Balcanes, decidió movilizar su ejército en apoyo a Serbia. Esto fue interpretado como una amenaza por Alemania, que temía verse atrapada en una guerra en dos frentes: uno con Rusia al este y otro con Francia al oeste. Como respuesta, Alemania declaró la guerra a Rusia el 1 de agosto de 1914. La situación se intensificó aún más cuando Francia, aliada de Rusia, se vio arrastrada al conflicto, y el 3 de agosto de 1914, Alemania declaró la guerra a Francia. (82)

El 4 de agosto de 1914, Alemania, siguiendo el Plan Schlieffen, invadió Bélgica con la intención de atravesar su territorio para atacar a Francia desde el norte. Este acto violaba la neutralidad de Bélgica, lo que llevó a que el Reino Unido declarara la guerra a Alemania ese mismo día. (83)

El conflicto ya no se limitaba solo a Austria-Hungría y Serbia. En cuestión de días, las principales potencias de Europa se alinearon en dos bloques opuestos: la “Triple Alianza” (también conocida como las Potencias Centrales), compuestas por Alemania, Austria-Hungría e Italia (la cual posteriormente cambiaría al bando contrario tras firmar el tratado de Londres en 1915), a las que se uniría el Imperio Otomano, y la “Triple Entente” (también conocida como los Aliados), que incluían a Francia, Rusia, el Reino Unido, y más tarde, Estados Unidos, que se unió a la guerra en 1917. La guerra se transformó rápidamente en un conflicto de escala mundial. (83)

La invasión de Bélgica no solo cambió la política internacional, sino que también dio origen a una de las características más notables de la Primera Guerra Mundial: la guerra de trincheras. En lugar de la rápida victoria que esperaban los líderes alemanes, después de haber derrotado a la resistencia belga y adentrarse en territorio francés, poniendo rumbo a París, la guerra se estancó en una intensa lucha de desgaste a lo largo de una línea de trincheras que se extendía desde el Mar del Norte hasta Suiza. Esta guerra de posiciones, caracterizada por avances mínimos y millones de bajas, se prolongó durante gran parte del conflicto. (82)

La Batalla del Marne, librada entre el 6 y el 12 de septiembre de 1914, fue un punto de inflexión. Las fuerzas alemanas habían avanzado casi hasta las

puertas de París, pero las tropas francesas, con el apoyo de los británicos, detuvieron el avance alemán. Este fue un gran revés para el ejército alemán y marcó el comienzo de un largo período de guerra estancada en el frente occidental. (82)

Las trincheras se convirtieron en un símbolo de la brutalidad y la desesperanza de la guerra, y las condiciones para los soldados eran extremadamente insalubres: barro, enfermedades, ratas, y la constante amenaza de ataques y bombardeos. (87)

Mientras tanto, en el frente oriental, la situación fue diferente. A pesar de algunas victorias iniciales, el ejército ruso, que estaba mal preparado y carecía de la infraestructura logística necesaria, sufrió derrotas en varias batallas clave, como la Batalla de Tannenberg en agosto de 1914, donde las fuerzas rusas enfrentaron una aplastante derrota a manos de los alemanes, aunque la ofensiva, provocó el traslado de varias divisiones alemanas desde el frente occidental al occidental, permitiendo a Francia decidir el resultado a su favor en la batalla de Marne. El imperio ruso, aunque contaba con un ejército numeroso, no pudo mantener un frente sólido contra las Potencias Centrales y fue empujado hacia el este, perdiendo grandes territorios en Polonia y el Báltico. (82)

La situación en los Balcanes tampoco era favorable, los aliados, principalmente Reino Unido y Francia, trataron de abrir un nuevo frente en la región mediante una campaña en 1915, en la península de Gallípoli. Su idea era forzar la rendición del Imperio Otomano y asegurar una ruta de suministro crucial hacia Rusia, que estaba lidiando con grandes problemas logísticos por la falta de acceso directo al mar. En primer lugar, trataron de tomar el estrecho de los Dardanelos mediante bombardeos navales, utilizando la flota de acorazados inglesa, como el HMS Queen Elizabeth que se muestra en la imagen a continuación, lo que resultó inefectivo, llegando a perder varias naves a causa de minas marinas. Posteriormente, se trató de tomar la península por tierra, pero tampoco resultó efectivo. Esto supuso el fin de la campaña, resultando como una enorme derrota para los Aliados. (88)

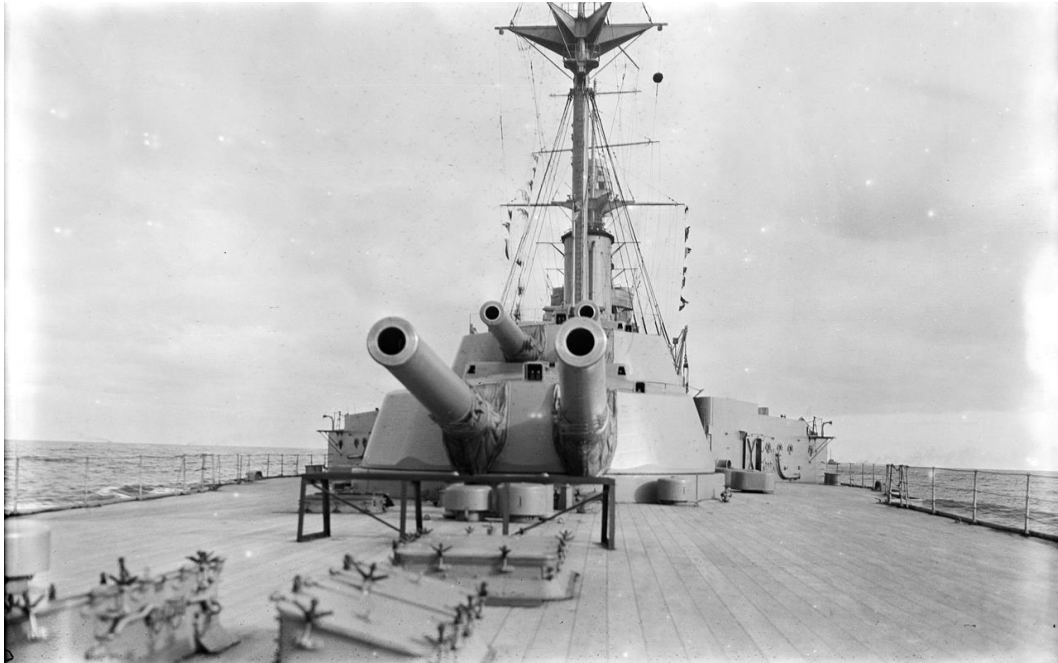


Ilustración 29 – Acorazado HMS Queen Elizabeth que participó en el bombardeo de los Dardanelos. (89)

En octubre de 1915, las Potencias Centrales, con el apoyo de Bulgaria, invadieron Serbia. El ejército serbio, ya debilitado por el cerco, fue derrotado y se vio obligado a retirarse a través de Albania hacia Grecia. Desde ese momento, Serbia quedó bajo el control de los Imperios Centrales, lo que supuso un duro golpe para los Aliados en la región de los Balcanes. (90)

Lejos del campo de batalla, el 7 de mayo de 1915, el transatlántico británico RMS Lusitania fue hundido por el submarino alemán U-20 frente a las costas de Irlanda. El Lusitania, que había zarpado de Nueva York con destino a Liverpool y llevaba casi 2,000 personas a bordo, fue impactado por un torpedo alemán. Minutos después, una segunda explosión selló su destino. En solo 18 minutos, el lujoso transatlántico se hundió, resultando en la muerte de 1,192 personas, entre ellas ciudadanos estadounidenses. (82)

El hundimiento generó una gran indignación internacional. Alemania defendió que el barco transportaba munición y proyectiles en dirección a Gran Bretaña, lo que lo convertía en un objetivo legítimo, hecho que se ha demostrado con el paso de los años y que daría sentido a las explosiones producidas en el transatlántico tras el impacto de un único proyectil, mientras que Gran Bretaña y Estados Unidos lo vieron como un acto de barbarie contra civiles inocentes. Esta tragedia inclinó la opinión pública estadounidense en contra de Alemania, contribuyendo, a la eventual entrada de Estados Unidos en la guerra en 1917. (82)

En el frente occidental, continuaba la batalla de desgaste. En febrero de 1916, Verdún, una ciudad fortificada en el noreste de Francia, se convirtió en el escenario de una de las batallas más largas y devastadoras de la Primera Guerra Mundial. El alto mando alemán planeó una ofensiva destinada a debilitar al ejército francés hasta su colapso. Verdún, con su simbolismo histórico y estratégico, fue elegida como el objetivo principal. El objetivo era infligir tantas bajas como fuera posible y forzar a Francia a rendirse. (91)

El ataque comenzó el 21 de febrero de 1916, cuando las fuerzas alemanas desataron un bombardeo masivo de artillería que causó una destrucción sin precedentes en las defensas francesas. Las piezas de artillería pesadas, como el Gran Berta (420 mm) alemán, los obuses Skoda de 305 mm austrohúngaros e incluso cañones navales de 280 mm, que, aunque normalmente se utilizaban en batallas marítimas, fueron adaptados para asediar las defensas terrestres, fueron los principales responsables del cerco. Estas enormes armas, capaces de disparar proyectiles a largas distancias y causar estragos en las fortificaciones, formaban el núcleo del ataque. Sin embargo, más cerca de la línea de frente, también se utilizaron piezas de artillería más ligera, como los obuses de 210 mm y 150 mm, que, aunque de menor calibre, fueron cruciales para mantener un fuego constante y preciso. En conjunto, estas armas crearon una barrera de fuego imparable que golpeó a las fuerzas francesas día tras día, reduciendo el terreno a escombros y dificultando cualquier intento de resistencia. (92)

A pesar de esta feroz ofensiva, Verdún debía ser defendida a toda costa. El ejército francés organizó una defensa desesperada, utilizando su artillería, que respondió a los ataques con cañones pesados, mientras sus tropas resistían cada avance alemán. La batalla de Verdún se convirtió en una guerra de desgaste, donde la artillería pesada, especialmente los obuses de gran calibre, marcó el ritmo de la lucha, transformando el paisaje en un campo de ruinas. Tras meses de combate, Verdún seguía bajo control francés, pero el costo humano fue enorme. (92)

Al mismo tiempo, con el fin de aliviar la presión en el frente de Verdún y avanzar contra las fuerzas alemanas, el Ejército Británico, que hasta ese momento había estado apoyando al Ejército Francés en operaciones puntuales, lanzó su primera ofensiva terrestre a gran escala. Esto ocurrió en la batalla del Somme, que se libró entre el 1 de julio y el 18 de noviembre de 1916. Después de una semana de intensos bombardeos por parte de la artillería aliada, el 1 de julio las tropas británicas avanzaron con la firme creencia de haber destruido las posiciones alemanas, pero se encontraron con una resistencia feroz que resultó en una masacre para el Ejército Británico. A pesar de los esfuerzos y la introducción de nuevas tecnologías, como lanzallamas o el tanque británico Mark I, que hizo su debut en este combate sin demasiado éxito, los avances

fueron mínimos y las bajas siguieron aumentando. La ofensiva se convirtió rápidamente en un desgaste de vidas humanas, ya que el terreno y las tácticas tradicionales de infantería resultaron ineficaces frente a la resistencia alemana. (93)

En 1916, antes de que Estados Unidos entrase oficialmente en el conflicto, un grupo de jóvenes estadounidenses, motivados por la causa aliada y su deseo de combatir contra Alemania, se ofrecieron para unirse a las fuerzas aéreas francesas. De este modo se formó la Escuadrilla Lafayette. Su objetivo era dar respuesta a la creciente amenaza de los aviones alemanes en el frente occidental de la Primera Guerra Mundial. (82)

A mediados de 1915, los aviones alemanes, como el Fokker Eindecker, empezaron a dominar el cielo, utilizando un sistema de sincronización de armas que les permitía disparar a través de la hélice sin dañar el avión. Esto les otorgó una ventaja significativa en el combate aéreo y en las misiones de reconocimiento y ataque. Además, los Zeppelines alemanes realizaban bombardeos estratégicos, creando una presión adicional sobre los aliados. La Escuadrilla Lafayette, volaba principalmente Nieuport 11 y 17, y más tarde, Spad VII, aviones franceses diseñados para contrarrestar la amenaza alemana. Aunque los aliados enfrentaban aviones más avanzados como el Albatros D.III, la escuadrilla luchó con valentía y desempeñó un papel crucial en el control del aire, derribando aviones enemigos y ganando reconocimiento por su contribución. (94)

En 1917, la guerra dio un giro significativo con la entrada de Estados Unidos en el conflicto. Aunque al principio el país había mantenido una postura neutral, varios factores, como los ataques a barcos estadounidenses por submarinos alemanes, como el hundimiento del Lusitania en 1915 y la interceptación del Telegrama Zimmermann (donde Alemania proponía una alianza con México para atacar a Estados Unidos si este se unía a los Aliados), llevaron al presidente Woodrow Wilson a decidir intervenir en la guerra. El 6 de abril de 1917, Estados Unidos declaró la guerra a Alemania. La entrada de Estados Unidos supuso una inyección de recursos frescos para los Aliados; aunque al principio las tropas eran limitadas y tardaron en organizarse y recibir entrenamiento en técnicas de guerra moderna, su contribución fue crucial para equilibrar la balanza en el frente occidental y desempeñaron un papel fundamental en el desenlace de la guerra. (86)

El frente Oriental también experimentó un cambio significativo. A principios de 1917, Rusia enfrentaba una grave crisis interna. La presión de la Primera Guerra Mundial, la escasez de alimentos, las malas condiciones de vida y las derrotas en el frente generaron un descontento generalizado entre la población. Esta situación culminó en la abdicación del zar Nicolás II. El nuevo

gobierno provisional intentó continuar con la guerra, pero la situación interna se deterioró y la población se volvió cada vez más hostil hacia el conflicto. (82)

En octubre de 1917, los bolcheviques, liderados por Vladímir Lenin, llevaron a cabo un golpe de Estado y asumieron el poder. Prometieron poner fin a la guerra y mejorar las condiciones internas, lo que les valió el apoyo de una parte considerable de la población. Lenin, al darse cuenta de que Rusia se sumía en una guerra civil contra los revolucionarios más moderados y tratando de concentrar todos los esfuerzos en este conflicto, inició negociaciones con las Potencias Centrales para poner fin a la participación de Rusia en la guerra. Sin embargo, dentro del gobierno bolchevique había desacuerdos sobre cómo proceder. Lev Trotski, el comisario de Asuntos Exteriores, consciente de que Alemania tenía prisa por firmar la paz para enfocarse en el frente occidental con la llegada del ejército estadounidense, y debido a las severas pérdidas territoriales que esto implicaría para Rusia, intentó evitar la firma de un tratado formal. (82)

Sin embargo, la situación en el frente oriental se volvió insostenible. En febrero de 1918, Alemania lanzó una ofensiva masiva y rápidamente ocupó vastas extensiones de territorio ruso. La incapacidad del gobierno bolchevique para hacer frente a esta ofensiva obligó a Lenin a aceptar las duras condiciones impuestas por Alemania. El 3 de marzo de 1918, Rusia firmó el Tratado de Brest-Litovsk, que puso fin oficialmente a su participación en la guerra. A cambio de la paz, Rusia cedió grandes territorios, incluyendo Polonia, Ucrania, Bielorrusia y los países bálticos. Esta retirada permitió a Alemania concentrar sus fuerzas en el frente occidental, lo que resultó crucial para sus últimas ofensivas. (82)

En 1918, tras años de luchas interminables, las Potencias Centrales intentaron una ofensiva final en el frente occidental. Con el colapso de Rusia debido a la Revolución Rusa, los mandos alemanes, llenos de confianza, vieron una oportunidad y lanzaron la Ofensiva de la Primavera, con el objetivo de llegar a París antes de que las tropas estadounidenses llegaran en masa. Sin embargo, la llegada de las tropas de refresco estadounidenses, la fatiga generalizada entre las fuerzas alemanas y las crecientes dificultades logísticas llevaron a que estas ofensivas, aunque inicialmente exitosas, fracasaran en favor de los aliados, quienes lograron resistir. Finalmente, las fuerzas aliadas tomaron la iniciativa y comenzaron a empujar a las tropas alemanas hacia atrás con una serie de ofensivas conocidas como la Ofensiva de los Cien Días. (95)

La situación en Alemania se volvió insostenible. La moral del pueblo alemán se desplomó y estallaron revueltas sociales y políticas en varias ciudades. Tras la capitulación de todos sus aliados ante la Triple Entente, el 11 de noviembre de 1918, Alemania firmó un armisticio en Rethondes, al norte de Francia,

poniendo fin a las hostilidades. Esto significaba que el Imperio Alemán, junto con sus aliados, había sido derrotado. (96)

El tratado de paz que se firmó posteriormente, conocido como el Tratado de Versalles de 1919, impuso condiciones muy duras a Alemania, a la que se consideró la principal culpable de la guerra. Alemania tuvo que ceder territorios, desmilitarizarse en gran medida y pagar enormes reparaciones de guerra, lo que dejó al país en una situación económica y política muy inestable, creando un caldo de cultivo para futuras tensiones y, finalmente, para el ascenso del nazismo y la Segunda Guerra Mundial. (96)

El impacto de la Primera Guerra Mundial fue devastador. Más de 10 millones de soldados perdieron la vida y muchos más resultaron heridos. Las estructuras políticas y sociales de Europa se vieron profundamente alteradas. El Imperio Austrohúngaro, el Imperio Ruso, el Imperio Alemán y el Imperio Otomano colapsaron, dando paso a un nuevo orden político. En este contexto, los antiguos imperios fueron reemplazados por una serie de nuevos países, muchos de los cuales lucharon por encontrar estabilidad, lo que generó tensiones que perduraron durante décadas. (97)

La Primera Guerra Mundial marcó un antes y un después en la historia del siglo XX. No solo alteró los mapas geopolíticos, sino que también modificó la política, la economía y la cultura a nivel global. Fue el inicio de nuevas ideologías y conflictos que influirían en el curso de la historia en las décadas siguientes. (97)

A continuación, se procede a explicar el proceso de soldadura por arco eléctrico según sus diferentes metodologías, así como su origen y desarrollo.

3.2 Historia de la Soldadura por Arco Eléctrico

Como se ha mencionado anteriormente, la soldadura por arco eléctrico tiene sus orígenes a finales del siglo XVIII e inicios del XIX, con el descubrimiento del arco eléctrico, posteriormente comienza la investigación para poder llevarlo a la práctica.

El arco eléctrico tiene su origen en el 1800 cuando el químico inglés, Sir Humphry Davy, desarrolló esta soldadura basándose en la aplicación de una corriente eléctrica a través de un espacio vacío o gas ionizado. (51)

Otra de las raíces de su desarrollo se produce en 1802, cuando el científico ruso Vasily Petrov lo observó por primera vez al hacer pasar corriente eléctrica entre dos conductores separados, constatando que las altas temperaturas generadas por ello eran capaces de fundir metales. Aunque en ese momento

las aplicaciones prácticas eran escasas, estos descubrimientos establecieron las bases para el uso del arco eléctrico en diversas tecnologías.

Durante las décadas posteriores, varios científicos de todo el mundo, incluido el británico Michael Faraday, llevan a cabo diversos experimentos con el arco eléctrico, aunque sus investigaciones se centran, principalmente, en aspectos teóricos. (98)

A mediados y finales del siglo XIX, y con la llegada en 1870 de la Segunda Revolución Industrial se desarrollaron una serie de procedimientos que permitían producir acero a gran escala y de forma industrial, lo que se tradujo en la necesidad de unir piezas metálicas de forma eficiente y rápida, siendo esto un factor clave en el avance de la soldadura por arco eléctrico. (99)

En 1881, el ingeniero francés Auguste de Méritens fue pionero en el uso del arco eléctrico para soldar las placas de plomo de baterías de almacenamiento. Este método marcó el primer uso documentado del arco eléctrico en una aplicación práctica, más allá de los experimentos. De Méritens utilizó electrodos de carbono para crear el arco eléctrico, y aunque el proceso no era ni eficiente ni estable, demostró que el calor producido por el arco podía ser lo suficientemente intenso como para fundir metales y unirlos. (51)

Un alumno suyo e ingeniero ruso, Nikolay Benardos, junto con su compañero Stanislaus Olszewski, químico polaco, inventaron y patentaron en 1885 un método que utilizaba electrodos de carbón para realizar soldaduras en materiales metálicos, como se muestra en la imagen a continuación. Este sistema, llamado "Electrogefest", facilitaba la creación de un arco eléctrico constante entre el electrodo de carbón y el metal base, lo que fundía el material y permitía su unión. Aunque este método era innovador, tenía limitaciones importantes. La ausencia de un revestimiento protector para el baño de soldadura dejaba el metal al descubierto, lo que provocaba problemas de oxidación, degradación rápida de los electrodos y la aparición de impurezas en la unión. A pesar de estas limitaciones, la técnica de Benardos y Olszewski representó un avance significativo, ya que dio comienzo a la soldadura por arco eléctrico a través de electrodos de carbón y supuso un paso hacia la estandarización del proceso. (100)

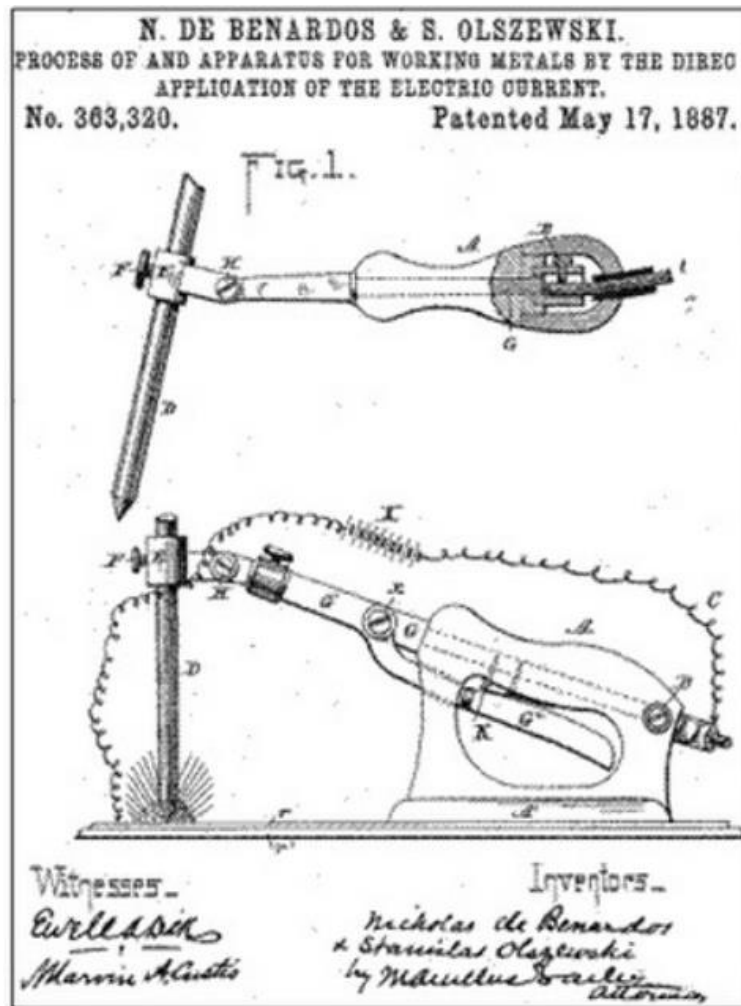


Ilustración 30 – Patente de Benardos y Olszewski: Arco eléctrico a través de un electrodo de carbón. (101)

En 1888, el ingeniero ruso, Nikolay Slavyanov, introdujo el concepto de utilizar un electrodo metálico consumible en el proceso de soldadura por arco eléctrico. Este enfoque representó un cambio significativo en comparación con los métodos anteriores, que utilizaban electrodos de carbón. (98) En el método de Slavyanov, el metal fundido se depositaba en un molde y el electrodo metálico no solo producía el arco eléctrico necesario para fundir el metal base, sino que también se fundía para integrarse en el metal de aportación, dando mayor homogeneidad y resistencia a la unión. (100)

De manera independiente, en Estados Unidos, Charles L. Coffin obtuvo en 1890 la patente por su método de soldadura por arco que utilizaba un electrodo metálico consumible para generar el arco eléctrico y, al mismo tiempo, proporcionar el material de relleno para la unión. (100) En la ilustración a continuación se muestra imagen de dicha patente. Este concepto presenta muchas similitudes con el trabajo de Slavyanov de 1888, pero al parecer, tanto

Coffin como Slavyanoff trabajaron de forma independiente, con desconocimiento del trabajo realizado por el otro. (51) Aunque la diferencia principal entre ambos métodos radica en que Slavyanov depositaba el metal fundido dentro de un molde, mientras que en el método de Coffin se funde el metal directamente sobre la junta entre las piezas de metal a unir. (100)

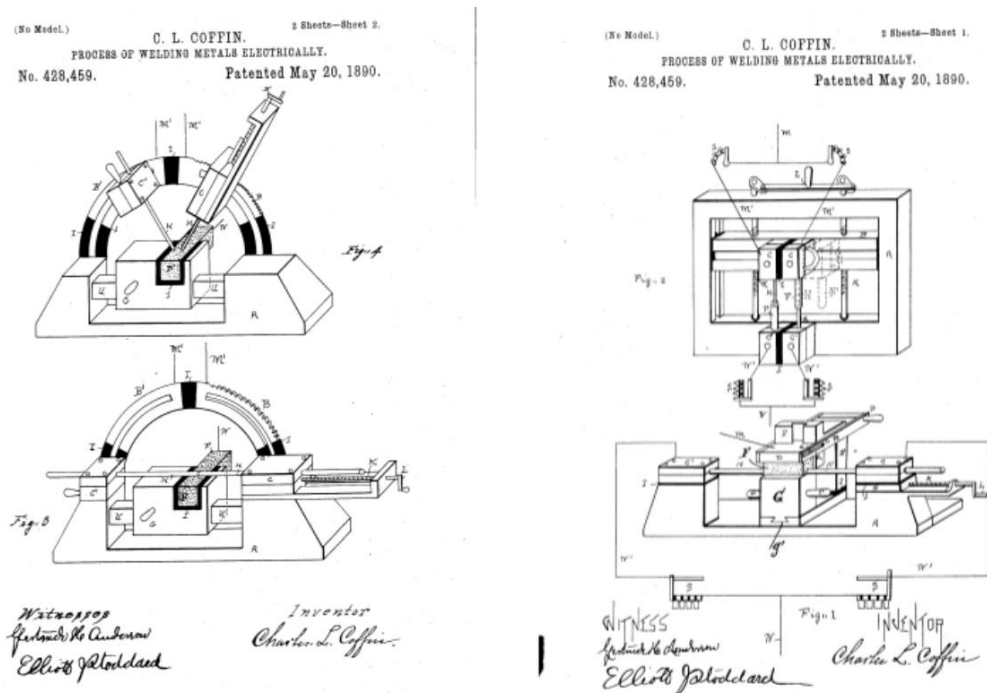


Ilustración 31 – Patente de Charles L. Coffin: Electrodo metálico consumible. (102)

Ya en el siglo XX, A.P Strohmenger, inventor británico, hizo una contribución importante en el año 1900 al introducir un electrodo de metal revestido, lo que revolucionó el proceso al cubrir el electrodo metálico con un material diseñado para estabilizar el arco eléctrico y proteger el metal fundido del aire. Este revestimiento no solo mejoró de manera significativa la calidad y la durabilidad de las uniones, sino que también hizo que el proceso fuera más controlable y versátil, abriendo la puerta a futuros avances en la soldadura industrial. (100)

En 1904, el ingeniero sueco Oscar Kjellberg, perfeccionó y patentó el electrodo metálico revestido. Kjellberg inventó un electrodo que consistía en un núcleo de hierro cubierto por un revestimiento hecho de materiales como óxidos y carbonatos. (100) Este revestimiento cumplía dos funciones clave: estabilizar el arco eléctrico durante el proceso de soldadura y formar una capa protectora sobre el baño de soldadura, previniendo la contaminación por oxígeno y nitrógeno. Esta invención fue un punto de inflexión en la historia de la soldadura por arco, ya que sentó las bases del estándar de la soldadura con electrodo revestido (SMAW). El electrodo revestido no solo mejoró la calidad de las

uniones, sino que también hizo el proceso más manejable y eficiente, permitiendo trabajar con mayor precisión en una variedad de materiales. (51)

Kjellberg, fundó ese mismo año, la compañía sueca ESAB (Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget), que fue la encargada de perfeccionar y comercializar el electrodo revestido, convirtiéndose en una empresa líder en la fabricación de equipos especializados de soldadura. (51)

La Primera Guerra Mundial fue un momento clave en la evolución de la soldadura por arco. Aunque los métodos todavía estaban en sus primeras etapas, la urgencia de construir y reparar rápidamente barcos, aviones y estructuras metálicas impulsó la adopción de esta tecnología. En particular, se emplearon procesos de soldadura por arco en la construcción de cascos de barcos, aunque también se empleó en aviones lo que permitió reducir tanto los tiempos como los costos en comparación con los métodos tradicionales de remachado. (103)

En 1919, el estadounidense C.J. Holslag hizo una contribución significativa al desarrollar un sistema de soldadura por arco que utilizaba corriente alterna (AC). Aunque la corriente continua (CC) era la norma más común, el uso de AC ayudó a disminuir los costos de los equipos, lo que los hizo más asequibles. Sin embargo, la adopción general de la soldadura con AC fue lenta hasta que ganó popularidad en los años 30. (100)

Ese mismo año se creó la American Welding Society (AWS) en los Estados Unidos, una organización enfocada en la estandarización, educación y avance de la tecnología de soldadura. La AWS tuvo un papel crucial en la difusión del conocimiento y en el establecimiento de normas de seguridad y calidad, lo que facilitó la adopción de nuevos métodos. (52)

En los años siguientes, empresas fundadas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, comenzaron a desarrollar avances significativos en la soldadura e introducirlos en la industria, lo que produjo un impacto fundamental en la comercialización y mejora de la soldadura por arco eléctrico. (51)

Lincoln Electric, empresa estadounidense fundada en 1895 por John C. Lincoln, fue una de las compañías más influyentes en la historia de la soldadura. Pese a que en primer lugar se fundó para la fabricación de motores eléctricos, se fue diversificando hacia la tecnología de soldadura hasta convertirse en uno de los líderes de la industria. En 1927, Lincoln introdujo su primer soldador portátil de corriente alterna, que hizo más práctica y económica la aplicación de la soldadura por arco eléctrico en talleres pequeños y en obras. (51)

A partir de 1920 se comenzó a introducir la soldadura automática. En este año, P.O. Nobel ingeniero que trabajaba para General Electric, empresa estadounidense fundada en 1892 por Charles A. Coffin, entre otros, desarrolló un sistema pionero de soldadura automática que utilizaba un cable de electrodo desnudo, el cual se alimentaba de manera automática y se regulaba según el voltaje del arco. Esta innovación representó uno de los primeros avances hacia la automatización en el proceso de soldadura. (100)

Durante la década de 1920, los soldadores empezaron a enfrentar un desafío común: la exposición de la zona de soldadura a los gases en el aire, como el oxígeno y el nitrógeno, que provocaban defectos en las soldaduras, tales como porosidad o fracturas. Estos problemas eran especialmente evidentes al soldar metales sensibles, que reaccionaban negativamente al contacto con estos gases. Esto hizo que durante esta década se desarrollase la investigación sobre la protección del arco eléctrico y el área de soldadura mediante el uso de gases aplicados externamente.

Fue en 1926, cuando los estadounidenses H.M. Hobart y P.K. Devers, que trabajaban para General Electric Company, solicitaron sus patentes, en las que mediante el uso de atmósferas de argón y helio protegían el arco. El desarrollo del uso de estos gases para proteger el área alrededor del arco en la soldadura por arco fue un paso previo al desarrollo de la soldadura por arco de tungsteno con gas (TIG). Asimismo, se realizaron experimentos con un sistema en el que el electrodo, alimentado como un cable, pasaba a través de una boquilla concéntrica, lo que posteriormente derivó en el proceso de soldadura por arco de metal y gas (MIG). Aunque estos métodos fueron investigados en esa época, su evolución y aplicación práctica se concretaron en años posteriores. (100) A causa del elevado coste del argón y el helio en esa época y General Electric, la cual consideró que la industria de la soldadura no estaba preparada para este proceso y el equipamiento no estaba debidamente desarrollado. (51)

En los primeros años de la década de 1930, la industria pesada se enfrentaba a importantes desafíos técnicos. La construcción de estructuras metálicas, barcos y tuberías demandaba métodos de unión más rápidos, confiables y eficientes que los que se utilizaban hasta ese momento. (50)

En este contexto, el ingeniero Robinoff comenzó a explorar la posibilidad de cubrir el arco de soldadura con un material granular para prevenir la contaminación del aire y mejorar la calidad de la soldadura aumentando su eficiencia en la industria pesada, especialmente en la unión de tuberías.

En 1930, Robinoff, patentó una versión inicial del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW), elaborado en la National Tube Company, empresa estadounidense fundada en 1891 como resultado de la fusión de varias

empresas especializadas en la producción de tubos de acero, para realizar uniones longitudinales en sus tuberías. (50) Sin embargo, este proceso era una versión temprana del proceso SAW, que se comercializó e industrializó gracias a avances posteriores. (51)

Fue el ingeniero estadounidense Harry E. Kennedy quien a finales de la década de los años 20 y principios de la década de los años 30 comenzó su misión de investigar a cerca de una técnica que permitiera soldar largas juntas metálicas de forma eficiente, logrando un acabado uniforme y que fuese escalable a la industria a gran escala. Pronto se le unieron a su propósito otros dos ingenieros estadounidenses, Lloyd Jones y Maynard Rothermund, los tres ingenieros comenzaron a experimentar con el concepto desarrollado previamente por Robinoff: cubrir el arco eléctrico con un material granular, conocido como "flujo", que lo protegiera de la contaminación externa. En 1935, tras numerosas pruebas y ajustes, el equipo logró perfeccionar su método y gracias al reconocimiento del valor del procedimiento por parte de la compañía estadounidense Linde Air Products Co., presentaron una patente para lo que llamaron soldadura por arco sumergido (Submerged Arc Welding, SAW). El nombre comercial que eligieron para el proceso fue "Unionmelt", en referencia al flujo fundido que era esencial en el procedimiento.

Este avance permitió que el proceso se automatizara por completo, utilizando un electrodo en forma de alambre continuo que se alimenta de manera constante al arco eléctrico, mientras que un flujo granular se aplica alrededor para cubrir y proteger el arco. El proceso "Unionmelt" se convirtió en una solución ideal para realizar soldaduras largas y rectas en materiales gruesos. Su capacidad de automatización y la producción de cordones de soldadura de alta calidad lo hicieron especialmente valioso en la industria manufacturera. (51)

La Segunda Guerra Mundial aceleró el desarrollo y la adopción generalizada de la soldadura por arco eléctrico. La demanda de construir barcos, tanques, aviones y otros equipos militares en grandes cantidades impulsó la innovación y el perfeccionamiento de las técnicas de soldadura. (50)

Con la llegada de la Segunda Guerra mundial, imperaba la necesidad de soldar materiales ligeros como el aluminio y el magnesio, sobretudo en la industria aeronáutica, esto intensificó las investigaciones a cerca de procesos que pudiesen solventar este problema. (50)

Fue en 1940 cuando al ingeniero estadounidense Russell Meredith, que trabajaba para Northrop Aircraft, Inc., se le asignó la tarea de investigar un método para poder soldar un aeroplano de magnesio. (51)

Utilizando la idea desarrollada por Charles L. Coffin en 1890 y los posteriores avances y desarrollos de H.M. Hobart, quien utilizó Helio como medio de protección del arco y P.K. Devers quien utilizó argón para esta misma función, comenzó a experimentar con métodos para lograr su objetivo. (100)

Tras los primeros ensayos, Meredith probó la alimentación de alambre de magnesio mediante gas inerte, que se descartó por las imperfecciones que se liberaban en la soldadura, aunque los resultados arrojaban que merecía la pena continuar investigando la protección de la soldadura con estos gases. Continuando su investigación, llegó a la conclusión de que sería mejor utilizar un electrodo no consumible, seleccionando como material el tungsteno, dando así lugar a la soldadura por arco con gas de tungsteno (GTAW o TIG). El proceso se patentó en 1942, bajo el nombre comercial de "Heliarc", por el gas utilizado para la protección del arco. A continuación en la ilustración se puede apreciar esta patente. Posteriormente, Northrop vendió los derechos de esta patente a Linde Air Products, que continuó la investigación y comercialización a nivel industrial de este proceso, produciendo la antorcha enfriada por agua. (51)

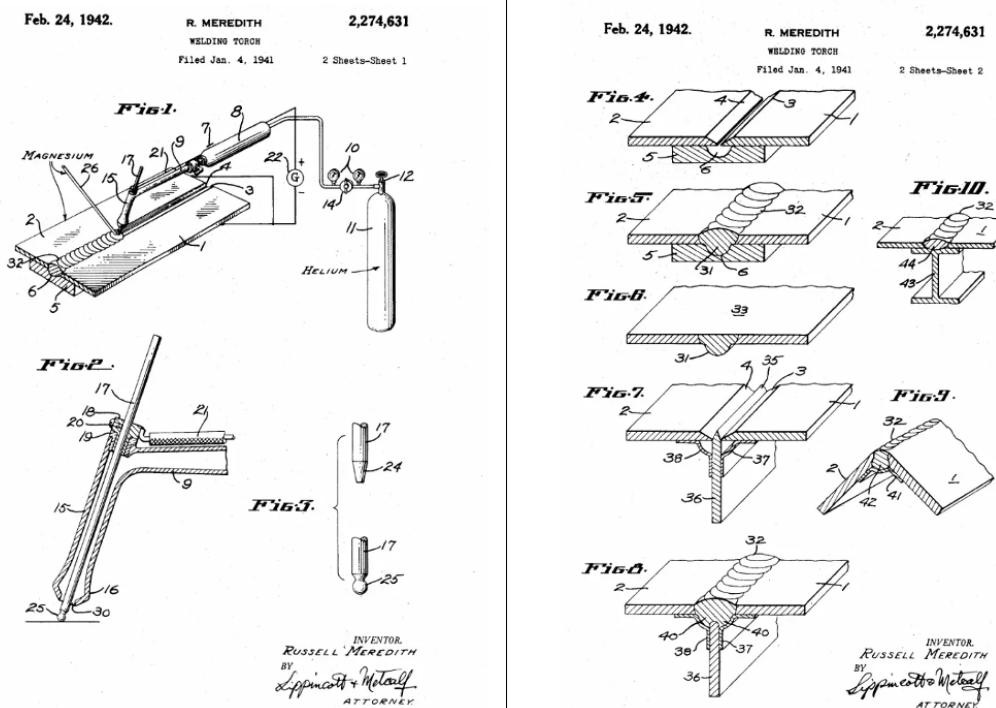


Ilustración 32 - Patente de Russell Meredith en 1942: soldadura por arco con gas de tungsteno (GTAW o TIG) (104)

En este contexto, la soldadura TIG se consideraba la mejor opción para unir aluminio y magnesio, pero al trabajar con piezas de gran espesor, era necesario precalentarlas. Esto se convertía en un inconveniente en aplicaciones a gran escala, como la construcción naval o la producción en masa, donde no era práctico calentar las piezas de antemano. Debido a la alta conductividad

térmica de estos metales, actuaban como grandes disipadores, dispersando rápidamente la energía aplicada. Como resultado, no existía un método de soldadura que pudiera generar y mantener el calor suficiente en un área pequeña para unir de manera eficiente secciones gruesas de aluminio y magnesio.

Esto desencadenó en nuevas investigaciones para resolver el problema y buscar posibles alternativas. (51)

En 1948, tras una investigación conjunta entre Battelle Memorial Institute y Air Reduction Laboratories, se desarrolló con éxito la soldadura por arco de gas y metal (GMAW). El método desarrollado en 1948, conocido actualmente como soldadura MIG (Metal Inert Gas), consistía en utilizar un electrodo continuo con forma de alambre, en lugar de un electrodo de tungsteno corto, mientras se protegía tanto el arco como el baño de fusión con un gas inerte (originalmente, argón o helio), todo ello suministrando la corriente de soldadura mediante generadores de corriente continua. (100)

A lo largo de los años posteriores, al observarse que el proceso GMAW destacaba por su gran versatilidad entre las técnicas de soldadura por arco, se inició un período de experimentación con este innovador método. (51)

Muchas mejoras y nuevos desarrollos se sucedieron, uno de los primeros fue la soldadura MIG por puntos, desarrollada por Linde Air en 1951 bajo el nombre comercial de soldadura “Sigma”.

En este contexto, y para la optimización de los procesos de soldadura, diversas empresas realizaron estudios sobre el uso de los gases de protección, ya que los gases inertes, argón y helio, pese a las buenas propiedades que conferían, resultaban económicamente costosos. En ese momento el argón se establecía generalmente como la opción más generalizada para el método MIG y el helio era el gas protector más utilizado en la soldadura TIG. Con el tiempo, se empezó a experimentar con diferentes combinaciones de gases más económicas y accesibles, lo que desembocó en el descubrimiento de que la mezcla de argón y dióxido de carbono proporcionaba excelentes resultados en la soldadura de acero inoxidable. (51)

En 1953, los científicos soviéticos Lyubavskii y Novoshilov presentaron la aplicación de la soldadura con electrodos consumibles utilizando dióxido de carbono como gas protector. Este hallazgo demostró que el dióxido de carbono, un gas mucho más económico y fácilmente disponible, podía ser empleado para proteger el baño de fusión en la soldadura por arco. Aunque el CO_2 no es un gas inerte y puede provocar ciertas reacciones con el metal fundido, encontraron que su uso permitía realizar soldaduras eficientes y estables, especialmente en aceros al carbono y de baja aleación. (105)

Este avance supuso el desarrollo del proceso de soldadura con gas metálico activo (Metal Active Gas, MAG). (34)

Posteriormente a la introducción del dióxido de carbono como gas protector en la soldadura, se percibió que, aunque el CO₂ puro era efectivo para soldar acero en ciertas aplicaciones, presentaba inconvenientes como un exceso de salpicaduras y un arco inestable que limitaban su uso generalizado.

Como consecuencia, se empezaron a hacer esfuerzos para combinar el dióxido de carbono con gases inertes como el argón, lo que mejoraba la estabilidad del arco y disminuía las salpicaduras, al tiempo que se mantenían las ventajas de penetración profunda del CO₂. Con el tiempo, estas mezclas se perfeccionaron y se adaptaron a las necesidades específicas de diversas aplicaciones de soldadura, una práctica que sigue siendo común en la actualidad. (51)

A finales de los años cincuenta, se introdujo una innovación importante en este proceso: el microalambre, arco corto o transferencia por inmersión. Esta técnica consistió en emplear un arco eléctrico de menor diámetro y fuentes de alimentación con una mejor regulación de corriente y voltaje. Esta variación permitió soldar materiales delgados con menos deformaciones y mayor estabilidad, convirtiéndose en la opción preferida para muchas aplicaciones industriales. Gracias a esta evolución, la soldadura con CO₂ se estableció como una de las técnicas más utilizadas dentro de las diferentes modalidades del proceso de soldadura por arco metálico con gas. (100)

En 1954, Arthur Bernard, de la Bernard Welding Equipment Company, introdujo un sistema automático de soldadura que utilizaba dióxido de carbono como gas de protección y alambre con núcleo de fundente. Este fue un avance significativo, ya que combinaba las ventajas del proceso de soldadura con gas protector con el uso de un electrodo tubular, que contenía fundente y materiales de aleación en su interior, mejorando la calidad del cordón. (100)

Este sistema fue una innovación clave dentro de la soldadura GMAW, facilitando una mayor estabilidad del arco y mejorando las propiedades del metal depositado. (100) Fueron muchas las empresas que intervinieron en el desarrollo de este nuevo avance, aunque fue National Cylinder Gas la que obtuvo la patente sobre este proceso en 1957, comercializándolo bajo la marca registrada “Dual Shield”. (51)

Posteriormente surgieron nuevas investigaciones sin obtener el éxito de la soldadura “Dual Shield”, aunque algunas resultaron innovadoras. (51)

En 1959 (100), la empresa Lincoln Electric Company desarrolló una variante del proceso “Dual Shield”, en el que también se utiliza un alambre tubular con

núcleo fundente, pero sin necesidad de suministro de gas externo. El proceso fue registrado bajo el nombre de “Innershield”. (51)

La empresa Linde Air Products Co. de la mano de H. E. Kennedy (106), desarrolló el proceso conocido como “Unionarc”, en un intento de mejorar la soldadura por arco, combinando su tecnología de arco sumergido (SAW) registrada como “Unionmelt”, con el uso de dióxido de carbono (CO_2) como gas de protección. (51)

La idea detrás de “Unionarc” era aprovechar las ventajas del fundente utilizado en “Unionmelt”, pero sin cubrir completamente el arco eléctrico, lo que permitía una mejor visibilidad del proceso. En este método, el fundente en polvo era transportado por el flujo de CO_2 hasta la boquilla de soldadura, donde un campo magnético lo guiaba hacia el alambre de soldadura. A medida que el alambre se fundía, el fundente cumplía una doble función: refinaba el metal depositado y lo protegía de la contaminación atmosférica, mientras que el CO_2 proporcionaba una capa adicional de protección gaseosa. (106)

A mediados del siglo XX, la industria metalúrgica estaba experimentando una transformación rápida, impulsada por la necesidad de mejorar los métodos de corte y soldadura de materiales cada vez más sofisticados. Uno de los mayores retos de la época era el procesamiento del aluminio y otros metales no ferrosos, que no podían ser cortados de manera efectiva con los métodos tradicionales corte. Fue en este contexto que se introdujo el arco de plasma, un proceso que revolucionaría la forma en que se trabajaban estos materiales.

En 1953, el ingeniero de Linde Air Products, Robert M. Gage, comenzó a investigar la fusión por arco en lingotes de titanio. Durante sus experimentos con gases inertes y arco eléctrico, notó que el comportamiento del arco eléctrico se asemejaba al de una llama de gas. A partir de esta observación, ideó la forma de confinar y acelerar el arco utilizando una boquilla estrecha, lo que llevó a la creación de un chorro de plasma de alta velocidad y temperatura. Este descubrimiento abrió la puerta a una nueva tecnología que pronto encontró aplicaciones más allá de la fusión de metales.

El primer uso industrial del arco de plasma se dio en el corte de aluminio, un material que siempre había sido complicado de manejar. Hasta ese momento, los fabricantes de estructuras de aluminio, como los vagones de ferrocarril, tenían que recurrir a métodos rudimentarios y laboriosos. Cortar una simple abertura en la parte superior de un vagón podía llevar hasta cinco horas, ya que era necesario marcar la forma, seguir la línea con un cincel neumático y, finalmente, retirar el material sobrante. Con la llegada del corte por plasma, esta tarea se redujo a solo cinco minutos, lo que representó un avance sin precedentes en términos de eficiencia. (51)

Desde su introducción comercial en 1955, el arco de plasma se estableció rápidamente como la técnica preferida para cortar aluminio, pero su desarrollo no se detuvo en ese momento. Entre 1955 y 1957, el proceso fue perfeccionado y pronto se dieron cuenta de que el principio del estrechamiento del arco también podía aplicarse a la soldadura, lo que llevó al desarrollo de la soldadura por arco de plasma (PAW). (51)

Tras varios años de investigación, en 1957, Robert M. Gage patentó el proceso de soldadura por arco de plasma como se muestra en la ilustración a continuación: (100)

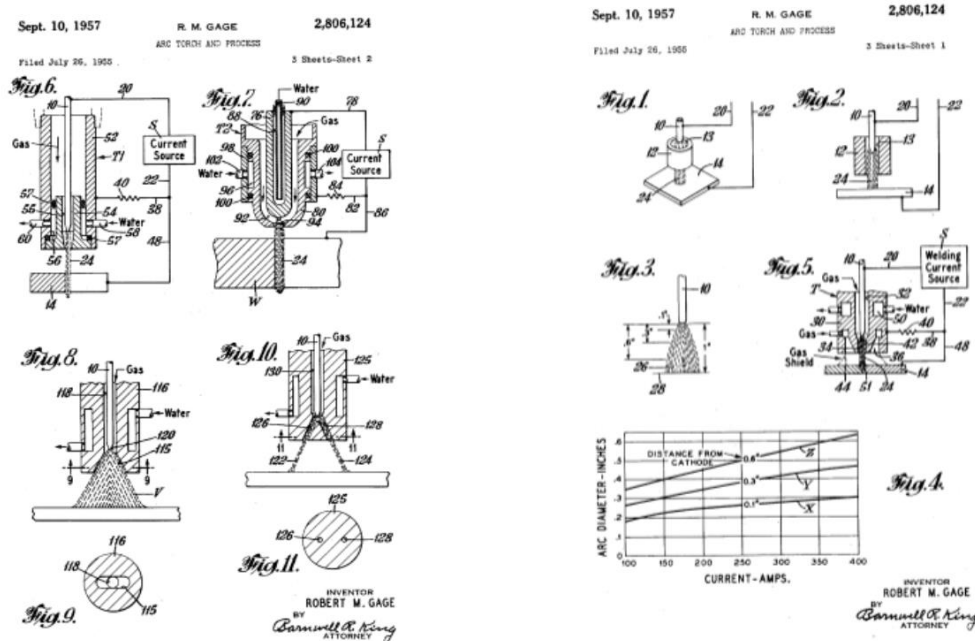


Ilustración 33 – Patente de Robert M. Gage en 1957: soldadura por arco de plasma (PAW) (107)

Posteriormente, en 1958, los ingenieros de la compañía Linde lograron adaptar este proceso para cortar acero inoxidable, un material que resultaba complicado de procesar con técnicas convencionales. Este avance hizo que el plasma dejara de ser un método exclusivo para el aluminio y se convirtiera en una herramienta esencial para la industria metalúrgica en general. (51)

Desde su invención en los años 50, la soldadura por arco de plasma se ha consolidado como una de las técnicas más avanzadas y versátiles en el ámbito de la soldadura por arco eléctrico. Su desarrollo dio inicio a una nueva era en la tecnología de unión de metales y continúa siendo un elemento fundamental en la fabricación moderna de estructuras que requieren alta exigencia. (108)

A partir de los años 60 y hasta la actualidad, la soldadura por arco eléctrico ha avanzado de manera constante gracias a la automatización, la digitalización y la mejora de materiales y procesos. La llegada de sistemas mecanizados y

robots soldadores transformó la industria, ofreciendo mayor precisión y eficiencia en la producción. En la actualidad, la soldadura por arco eléctrico continúa su evolución, integrando inteligencia artificial y tecnologías avanzadas que aseguran un control y calidad sin igual, reafirmando como una herramienta clave en la industria moderna. (109)

La soldadura por arco eléctrico, que apareció a finales del siglo XIX, transformó la forma en que se unen los metales al ofrecer mayor resistencia y eficiencia. Con el paso del tiempo, la adición de gases de protección mejoró la estabilidad del proceso, lo que condujo al desarrollo de la soldadura TIG en la década de 1940. Este método, que utiliza un electrodo de tungsteno y un gas inerte como el argón, permitió realizar soldaduras más precisas y limpias en metales como el aluminio y el acero inoxidable. Su impacto fue fundamental en industrias como la aeronáutica y la automotriz, representando un avance significativo en la evolución de la tecnología de soldadura.

Desde los primeros experimentos con electrodos recubiertos hasta el desarrollo de técnicas automatizadas y procesos especializados como la soldadura por arco de plasma, cada innovación permitió ampliar las aplicaciones de esta tecnología, haciéndola más eficiente y versátil. (52)

3.3 Soldadura por arco con electrodo metálico desnudo

En el momento en que estalló la primera Guerra mundial, la soldadura estaba sufriendo un proceso de crecimiento y auge muy importantes. La Segunda Revolución Industrial provocó un gran desarrollo de las estructuras metálicas, con por ejemplo procesos que permitían la producción de acero a gran escala. Esto generó la necesidad de unir estas estructuras metálicas, lo que se tradujo en una búsqueda exhaustiva de métodos de unión, es decir, de métodos de soldadura, entre ellos de soldadura por arco eléctrico. (110)

Hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX, los métodos de soldadura más utilizados eran la soldadura por forja y la soldadura oxiacetilénica. Estos métodos, eran lentos y costosos. Además no eran eficaces para la unión de piezas gruesas ni para la producción a gran escala, siendo difíciles de automatizar. Todo ello, llevó al desarrollo de métodos que realizaran soldaduras más confiables, resistentes y duraderas. (111)

Durante el siglo XIX, gracias a los avances que se sucedieron en electricidad, se experimentó con el arco voltaico, pudiendo realizar descargas eléctricas que generaban una fuente de calor muy intensa, con temperaturas superiores a los 3500 °C. Esto, resultó de gran utilidad, ya que generó la posibilidad de fundir

piezas metálicas y unir las directamente. Con estos avances se observó la viabilidad de fundir un electrodo metálico consumible directamente sobre la pieza a soldar, dando lugar al desarrollo de la soldadura por arco eléctrico, que inicialmente empezaría con electrodos desnudos y se iría desarrollando y mejorando con el paso de los años. (112)

Como se ha mencionado anteriormente, tras los avances previos de Nikolay Benardos y Stanislaus Olszewski con electrodos de carbón, fue en 1888 y en 1890 cuando el ingeniero ruso Nikolay Slavyanov y Charles L. Coffin en Estados Unidos, respectivamente y de forma independiente, introdujeron el concepto de utilizar un electrodo metálico consumible para generar un arco eléctrico, que a su vez se fundiese, proporcionando material de relleno para la unión. Esto dio origen a la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo.

Posteriormente, en 1904 el ingeniero sueco Oscar Kiellberg, perfeccionó este método desarrollando y patentando el electrodo metálico revestido. El revestimiento aportaba más estabilidad al arco y protegía el baño de fusión de la contaminación atmosférica, lo que mejoraba considerablemente la calidad y consistencia de la unión. Sin embargo, como ocurre con muchas innovaciones técnicas, este proceso requería un proceso de adaptación industrial, desarrollo y estandarización.

Por ello, pese a que antes del inicio de la Primera Guerra Mundial, la soldadura por arco con electrodo metálico revestido ya había sido inventada y presentada, su implementación práctica aún no era viable a gran escala. El método no estaba lo suficientemente desarrollado ni era lo bastante confiable para cumplir las exigencias operativas y logísticas de un conflicto de tal envergadura. Como resultado, durante la Primera Guerra Mundial, se continuaron utilizando principalmente métodos más utilizados y establecidos hasta ese momento, como la soldadura por arco con electrodo desnudo. (113)

A continuación, se procede a explicar técnicamente el funcionamiento del proceso de soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, ya que como se ha explicado, fue el método de soldadura por arco más utilizado durante la Primera Guerra Mundial. Por otro lado, este método es la base tecnológica sobre la que se desarrollarían otros procesos de soldadura más avanzados, por tanto, entender el proceso y su base técnica permite conocer las ventajas y limitaciones del contexto industrial y bélico de el periodo en el que se desarrolló la Primera Guerra Mundial.

3.3.1 Proceso de Soldadura por arco con electrodo metálico desnudo

El arco eléctrico es una forma de conducción eléctrica entre dos conductores ocurrida a través de un gas ionizado, gracias a que los dos conductores

cercanos tienen entre ellos una diferencia de potencial considerable. A causa de esta condición, los electrones logran atravesar el espacio gaseoso (como por ejemplo el aire), venciendo la resistencia de este, generando una descarga y estableciendo un flujo de corriente. Este fenómeno se puede visualizar como una luminiscencia ultravioleta intensa, además de generar temperaturas muy elevadas, suficientes para fundir los metales entre los que se produce el arco. (114)

Desde un punto de vista conceptual, un arco eléctrico se genera cuando una corriente fluye a través de un gas entre dos electrodos, estableciendo un puente de plasma conductor. En este sentido, los electrones se desplazan desde el electrodo con carga negativa al electrodo con carga positiva, al contrario que los iones positivos que van del electrodo positivo al negativo. La interacción producida entre estas partículas genera un calor extremo junto con una intensa luz ultravioleta, además de un sonido característico, similar al del disparo de un arma de fuego. En la imagen a continuación se muestra este proceso. (114)

ZONAS DEL ARCO ELÉCTRICO

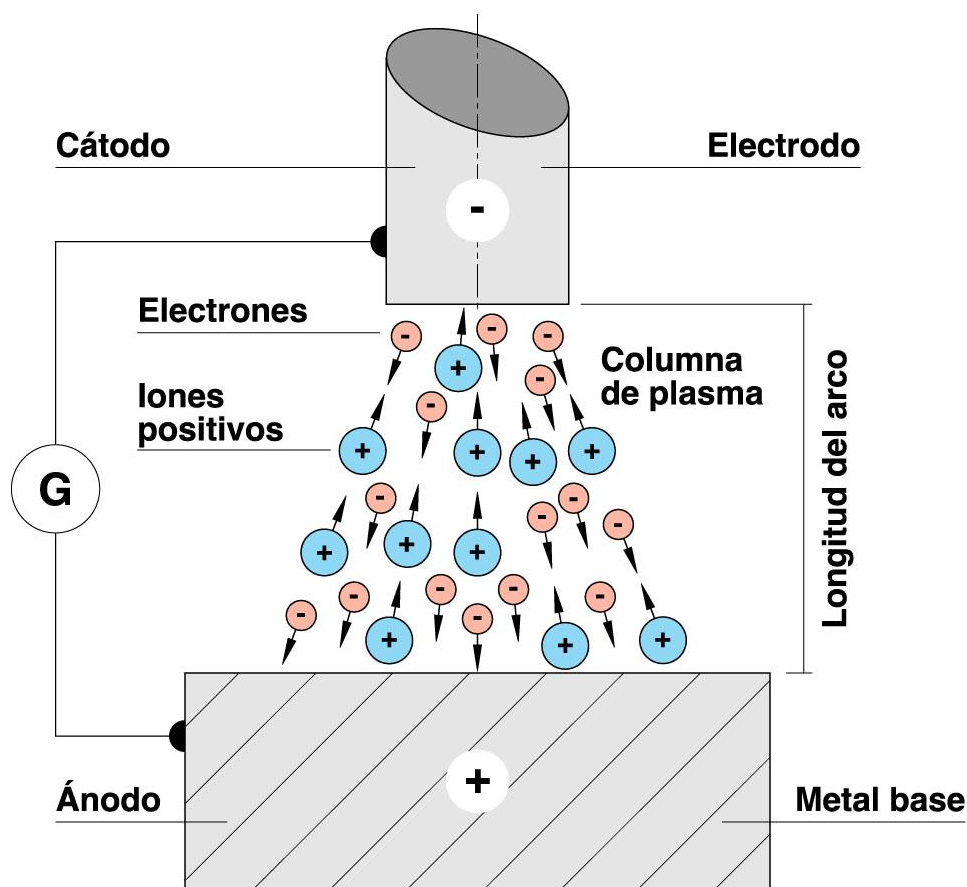


Ilustración 34 – Flujo de electrones e iones positivos en el arco eléctrico y longitud del arco. (115)

Entre la gran variedad de aplicaciones tecnológicas del arco eléctrico, la más relevante y utilizada es la soldadura por arco. Este método aprovecha las elevadas temperaturas producidas por el arco y las utiliza para fundir metales, permitiendo su unión de una forma más sencilla. En este caso, los dos electrodos son representados por el metal base que se pretende unir y el electrodo metálico que se utiliza en el sistema de soldadura, que en algunos casos puede actuar como material de aporte. (114)

El proceso de soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, en inglés: Bare Metal Arc Welding (BMAW), fue uno de los primeros procesos que se industrializaron y desarrollaron de soldadura por arco eléctrico. El desarrollo e industrialización de este proceso se produjo a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, dadas las necesidades del momento, y representó un gran avance respecto a los procesos de soldadura que se utilizaban en ese momento, como la soldadura por forja, ya que permitía la fusión de los metales mediante el calor producido por un arco eléctrico.

La soldadura por arco con electrodo metálico desnudo consiste en generar y mantener un arco eléctrico entre un electrodo metálico desnudo, es decir, sin revestimiento, y la pieza de trabajo que queremos soldar, que es conductora de electricidad. El proceso comienza poniendo en contacto el electrodo con la pieza de trabajo, posteriormente se separa ligeramente el electrodo de la pieza, momento en el que se produce la descarga eléctrica, fenómeno que se ha descrito anteriormente como arco eléctrico. (116)

Este arco, como se ha explicado, genera una descarga que actúa en forma de puente de plasma con una gran ionización, a causa de la transferencia de electrones al polo positivo e iones positivos al polo negativo, ofreciendo una elevada resistencia eléctrica, que libera una fuente intensa de calor. (114) Este calor, alcanza temperaturas que pueden superar los 3.000 °C, que son suficientes para fundir la superficie de la pieza de trabajo y la punta del electrodo metálico, realizando la soldadura en un punto preciso y pequeño de la pieza. La fusión de ambos materiales se realiza para que el metal fundido del electrodo actúe a su vez como material de aporte para la soldadura, rellenando el espacio entre las piezas a unir. (117)

En el proceso de soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, como su nombre indica, el electrodo no tiene ningún tipo de revestimiento. Además, en este proceso no se aplican ni gases protectores ni escoria durante la soldadura. Estas condiciones hacen que el baño de soldadura esté directamente expuesto al ambiente, esto puede desencadenar en la oxidación del metal fundido y la absorción de nitrógeno y otros gases atmosféricos. Esta situación de exposición al aire del baño de soldadura, puede derivar en defectos como porosidad, corrosión y fragilidad. (118)

Durante el proceso, uno de los puntos clave es el adecuado control de la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo, conocida como “longitud del arco”. Este es un factor crítico, ya que una distancia demasiado larga puede provocar salpicadura o incluso interrumpir el arco y una distancia demasiado corta puede ocasionar que el electrodo se pegue a la pieza, por lo que este control es clave para mantener la estabilidad del proceso y una calidad adecuada de la soldadura. (119)

Con respecto a la fuente eléctrica, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo puede utilizar tanto corriente continua (CC) como corriente alterna (CA), aunque este proceso siempre se ha realizado principalmente con corriente continua. Esto se debe a que, al no utilizar revestimiento ni protección, el arco no alcanza una gran estabilidad por sí mismo, por lo que no resulta lo suficientemente fuerte para aguantar las interrupciones, o cruces por cero, propias de la corriente alterna. Al contrario que la corriente continua, que proporciona mayor estabilidad y control al proceso. (120) Por otro lado, la corriente debe ajustarse en función del diámetro del electrodo y el material que se pretende soldar, normalmente se encuentra en un rango entre 30 y 300 amperios para los electrodos metálicos. (121)

En el proceso de soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, se produce la transferencia de los metales por fusión directa del propio electrodo con el metal a soldar en el área fundida. El electrodo, al ser metálico y consumible, actúa como material de aporte fundiéndose gracias a las elevadas temperaturas que genera el arco eléctrico. (122)

La ausencia del revestimiento del electrodo y de gases de protección o escoria, hace que sea un método muy susceptible de ser contaminado por el contacto directo con el aire, produciendo defectos como porosidades o fragilidad. Por ello, el control del proceso y de parámetros como la longitud del arco tienen un papel importante para lograr la mejor unión posible.

3.3.2 Equipo necesario, materiales utilizados para conformar el electrodo y desarrollo del proceso en la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo

A continuación, se procede a describir los materiales y equipos necesarios para realizar la unión de dos metales mediante soldadura por arco con electrodo metálico desnudo:

1. Fuente de alimentación:

Para realizar la soldadura por arco, es necesaria una fuente eléctrica de corriente continua (CC) o de corriente alterna (CA). En el caso de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, como comentado anteriormente, se

empleaban generadores de corriente continua, ya que ofrecían una mayor estabilidad del arco. También en este tipo de soldadura se utiliza la polaridad inversa, esto es: el electrodo se conecta al polo positivo de la fuente (+) y la pieza a soldar al polo negativo (-), esto se debe a que esta polaridad concentra la mayor parte del calor en el electrodo, favoreciendo tanto la fusión del mismo (factor esencial de este proceso ya que el electrodo se utiliza como material de aporte), como que al concentrar la mayor parte del calor en el electrodo, el metal base sufre menos deformaciones o quemaduras, muy útil en estructuras gruesas como la construcción naval, para la que fue muy utilizado este método. (123) El voltaje y la intensidad de la corriente eléctrica, se selecciona en función del grosor del metal y del diámetro del electrodo que se utilice. La intensidad de corriente oscila entre los 100 y 300 amperios y el voltaje varía entre 20 y 40 voltios aproximadamente. (121)

2. Cableado y conexiones:

Se utilizan cables de alta capacidad, preparados para soportar altas temperaturas y ser excelentes aislantes. Estos, transportan la corriente eléctrica desde la fuente eléctrica hasta el porta-electrodo y la pieza de trabajo. Se utilizan por norma general dos cables, el cable del electrodo y el cable de masa (también llamado de tierra). El primero conecta la fuente con el porta-electrodos y el segundo une la fuente con la pieza de trabajo mediante una sujeción que se coloca en una zona limpia y conductora de la pieza a soldar. La sección del cable se dimensiona en función de la longitud y la intensidad de corriente, cuantos más amperios y distancia, mayor es la sección del cable. (124)

3. Porta-electrodos:

Aparato que se encarga de sostener el electrodo durante la soldadura y permite su manipulación segura, permitiendo controlar mejor la longitud del arco. Al ser un electrodo consumible, debe sujetarse con firmeza y poderse remplazar de manera sencilla. El porta-electrodos debe ser conductor ya que está conectado al polo de la fuente de energía (según la polaridad que se utilice se conecta al cable positivo o negativo). (8)

4. Electrodo:

En este proceso, como su propio nombre indica el electrodo es una varilla metálica sin ningún tipo de revestimiento. El material debe ser un metal de elevada pureza, para evitar las impurezas que pueden contaminar la soldadura. El material seleccionado para los electrodos depende del metal de la pieza a soldar. Uno de los materiales más usados es el acero de carbono. La forma del electrodo es una varilla metálica de entre 20 y 45 cm de longitud y cuyo diámetro oscila entre 1.5 y 9.5 mm, este último se selecciona en función,

principalmente, del espesor del metal a soldar y la corriente que se vaya a utilizar. (125)

5. Sistema de apoyo o mesa de trabajo (opcional):

Se trata de buscar un equipo-mesa que proporcione una firme sujeción del material a soldar con el fin de contribuir a crear un arco de soldadura óptimo y que asegure una buena conexión con el circuito de masa o también llamado circuito de tierra. (126)

6. Pieza a soldar:

También denominada metal base, que es el metal que se pretende unir. El metal que se desea soldar debe estar limpio, libre de todos los contaminantes: polvo, grasa, óxidos superficiales, para que la unión de los metales mediante la soldadura, sea de la mejor calidad posible. (127)

A continuación, se muestra diagrama de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo:

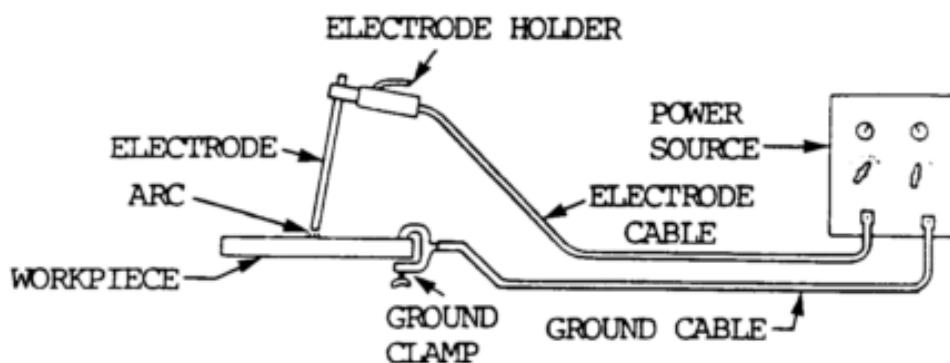


Ilustración 35 – Diagrama de soldadura por arco con electrodo metálico desnudo. (128)

Por otro lado, voy a proceder a exponer cual era el material más utilizado para conformar el electrodo en la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo.

En la soldadura por arco, el material del que esta formado el electrodo se selecciona en función de una serie de aspectos. Tiene que ser compatible con el material base, generalmente de una composición igual o similar, y aportar propiedades mecánicas a la soldadura que magnifique la bondad del material resultante. Otro dato que hay que tener en cuenta es si el metal que se pretende soldar va a exponerse a ambientes corrosivos, en cuyo caso ha de elegirse un material que conforme el electrodo con buena resistencia a la

corrosión, además de considerar la técnica de soldadura por arco que se vaya a utilizar, ya que, dependiendo de la protección de la soldadura, será mejor un material u otro en función la resistencia necesaria. Por ello, en el caso de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, que es la que nos ocupa, se utilizan materiales para conformar el electrodo que sean resistentes a la corrosión, siempre teniendo en cuenta la compatibilidad de este material con el metal que se pretende soldar.

El material se selecciona en función de sus propiedades específicas como la conductividad eléctrica, térmica, dureza, rigidez, facilidad de manipulación y resistencia.

En la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, el principal material utilizado para conformar el electrodo era el acero o acero al carbono.

El acero o acero al carbono, es, con diferencia, el metal que más se utilizaba en las soldaduras por arco con electrodo metálico desnudo, ya que, este metal, proporciona alta resistencia a la corrosión. Adicionalmente, fue uno de los primeros metales que se utilizaron cuando se desarrolló la soldadura por arco, por tanto, era el metal más común cuando se realizaban soldaduras por arco con electrodo desnudo, que fue de las primeras en aplicarse. Este material, provee resultados de buena calidad y es de fácil manejo. (117)

Como ya se ha mencionado, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, no cuenta con gases protectores ni revestimiento del electrodo, lo que lo hace un proceso susceptible de presentar defectos e impurezas. Para que esto no se produzca, se requiere una alta precisión durante la realización del proceso. El desarrollo del proceso de soldadura por arco con electrodo metálico desnudo consta de las siguientes etapas:

1. Preparación del material

En primer lugar, se realiza la limpieza del material a soldar, este punto es muy importante ya que impurezas como óxidos, suciedad o la grasa que existan en las superficies de las piezas a unir, pueden afectar a la calidad de la soldadura, provocando porosidades, una mala penetración o dificultades para encender el arco. Además, en el caso de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, este es un factor muy importante, ya que, al estar más expuesta a la corrosión, este proceso ayudará a reducir los efectos de la misma.

El proceso de limpieza debe ser exhaustivo, para su realización se utilizan distintos materiales y productos, dependiendo del contaminante. Como, por ejemplo, cepillos metálicos, disolventes químicos o esmeriles. En algunas ocasiones se preparan los bordes mediante biselado, creando una geometría

que facilita la fusión, esto suele realizarse en piezas más gruesas que requieren mayor penetración. (129)

2. Encendido del arco:

Una vez limpiado el material que se desea unir se coloca en posición, se enciende la fuente de alimentación (siempre comprobando que la polaridad es la correcta y regulado el amperaje en función del electrodo utilizado) y se fija la conexión a masa. (129)

El siguiente paso es encender el arco. Esto se realiza mediante los métodos de toque/vertical o raspado. El primero consiste en aproximar el electrodo verticalmente al metal base y separarlo un momento según se toque la pieza, formando un arco largo. Inmediatamente después se baja a una longitud de aproximadamente el diámetro del electrodo permitiendo realizar un cordón o punto de soldadura. El segundo método (raspado), consiste en realizar movimientos oscilatorios con el electrodo sobre la pieza de trabajo, inclinándolo ligeramente, una vez la punta del electrodo toca la pieza se enciende el arco. Al igual que en el primer método, se separa el electrodo rápidamente e inmediatamente se coloca a una longitud igual al diámetro del electrodo, realizando la soldadura. (130)

El encendido del arco genera una descarga eléctrica, que produce temperaturas extremadamente altas (alrededor de 3.000 °C) que funden el material de trabajo y la punta del electrodo, realizando la soldadura. (117)

3. Mantenimiento del arco:

Tras realizar el encendido del arco, el siguiente paso es mantenerlo activo. Para ello y como mencionado, se coloca el electrodo a una distancia constante aproximadamente igual al diámetro del electrodo. Esta distancia se conoce como longitud del arco. En el caso se establezca el arco a una distancia demasiado corta, el electrodo puede llegar a pegarse a la pieza, en esta situación hay que mover rápidamente el electrodo para evitar interrumpir el arco. En el caso la longitud del arco sea demasiado larga, se puede generar inestabilidad, salpicaduras o apagarse. (119)

Al mismo tiempo que se mantiene el arco a la distancia constante, se tiene que desplazar el electrodo de forma constante y continua por la junta, de manera que se deposite uniformemente el metal fundido. Dependiendo del tipo de junta y el espesor del material a soldar, se realizará este desplazamiento con el electrodo colocado en posición recta, inclinada, zigzag o incluso realizando pequeños movimientos oscilatorios. (130)

Cabe resaltar la importancia de la limpieza del metal base antes de realizar el arco eléctrico y la distancia a la que se coloca electrodo de la pieza de trabajo

(longitud del arco), ya que, en la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, al no utilizar revestimiento, el arco tiende a tener menor estabilidad, y tanto la suciedad de la pieza como una longitud mal regulada, pueden dificultar aún más el encendido del arco. (131)

4. Formación del cordón de soldadura:

Al desplazarse y fundirse el electrodo por la junta de soldadura, el metal del mismo, se mezcla a su paso con el metal base fundido. Al enfriarse, esta combinación se solidifica, formando el cordón de soldadura. (130)

En la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, el baño de soldadura (combinación de electrodo y metal base fundidos), se encuentra expuesto al aire. Como se ha indicado anteriormente, esto supone un riesgo y una desventaja. Ya que la exposición a la atmósfera del baño de soldadura, facilita la oxidación y absorción de nitrógeno u otros gases atmosféricos, pueden quedar atrapados en el cordón, lo que genera porosidad o incluso grietas. Por ello se debe realizar este proceso en ambientes con la menor contaminación posible, evitando elementos oxidados o humedades y con una intensa limpieza del material. (132)

5. Finalización:

Una vez terminado el cordón o llegado al final de la junta, hay que retirar el electrodo de forma controlada y cuidadosamente para interrumpir el arco sin dañar la soldadura. (129)

Al terminar el proceso, y tras solidificarse la soldadura, debe dejarse reposar el material soldado para que se enfríe de forma natural. Tras ello, se pueden utilizar herramientas adecuadas para su limpieza como cepillos de acero o esmeriles, eliminando posibles óxidos adheridos o imperfecciones superficiales. (129)

El cuidado meticuloso de cada uno de los pasos: preparación del metal base, sujeción de los materiales a soldar, elección y control de la intensidad y el voltaje de la corriente eléctrica, manipulación en la dirección correcta que mantenga el arco de soldadura para formar un cordón regular y de grosor adecuado y al terminar el proceso, la limpieza de las impurezas superficiales, producirán una unión de los metales soldados permanente y fiable. (131)

3.3.3 Ventajas y Desventajas

A continuación, se exponen las ventajas y desventajas que presenta la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo:

Ventajas

- **Bajo coste:** Al no utilizar materiales de protección, como gases protectores o electrodos revestidos, elementos utilizados en otros procesos de soldadura por arco, se abaratan los costes del proceso.
- **Simplicidad del equipo:** no requiere de elementos ni equipos tan especializados para su realización, lo que lo hace un proceso más accesible y fácil de implementar en situaciones adversas.
- **Rápida implementación:** Proceso rápido de llevar a cabo, favorable para las reparaciones de emergencia, lo que lo convierte en un método adecuado para entornos bélicos, sus reparaciones en el frente y en astilleros militares.
- **Seguridad:** Comparándolo con la soldadura oxiacetilénica, soldadura muy utilizada en la época de la Primera Guerra Mundial y que utiliza combustibles inflamables, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, era más segura al no utilizar gases explosivos o combustibles inflamables en entornos de guerra.

Desventajas

- **Falta de protección:** Como no se utilizan gases protectores, electrodos revestidos u otros métodos de protección, el baño de soldadura queda expuesto al aire de la atmósfera, facilitando la entrada de oxígeno, nitrógeno y otros gases atmosféricos, lo que genera corrosión, porosidad, óxidos, grietas y una potencial mayor fragilidad.
- **Estabilidad del arco baja:** la no existencia de revestimiento en el electrodo puede incurrir en dificultades para el encendido del arco y el posterior mantenimiento del mismo.
- **Limpieza exhaustiva:** Para reducir la aparición de impurezas, óxidos y corrosión, es conveniente realizar una extrema limpieza del metal base previamente a la realización del proceso y del cordón de soldadura posteriormente.

3.3.4 Limitaciones técnicas y protecciones adoptadas

Desde sus primeras aplicaciones industriales, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo dejó claro que tenía un potencial enorme, pero también una serie de problemas que hacían difícil usarla con plena confianza. El arco era complicado de controlar, el baño de fusión tendía a ser inestable y la soldadura quedaba demasiado expuesta al aire, lo que se traducía en cordones irregulares y, en más de un caso, poco fiables. A esto se sumaba que

las fuentes de alimentación eléctrica de la época no estaban pensadas para soldar y que los operarios apenas tenían experiencia, así que se enfrentaban a un proceso muy exigente sin normas claras ni herramientas específicas. En conjunto, la soldadura por arco con electrodo desnudo se encontraba en una especie de etapa intermedia, lo bastante prometedora como para atraer la atención de ingenieros y astilleros, pero todavía demasiado imperfecta como para sustituir los métodos tradicionales.

Para intentar superar estas limitaciones, los talleres que empezaron a trabajar con el arco eléctrico fueron probando una serie de soluciones prácticas destinadas a hacer el proceso más fiable y reducir defectos. Entre las más habituales destacaron las siguientes:

1. Procedimientos manuales mejorados

Los soldadores fueron perfeccionando la forma de mantener el arco estable, jugando con el ángulo, la distancia al metal y la velocidad de avance. En muchos talleres incluso se fijaron secuencias de soldadura para repartir mejor el calor y evitar deformaciones.

2. Pasadas múltiples y cordones de refuerzo

Las uniones gruesas o sometidas a esfuerzos importantes solían requerir varias capas. Estas pasadas adicionales ayudaban a corregir poros, pequeñas grietas o discontinuidades, dando más seguridad al conjunto.

3. Preparación y mecanizado de superficies

Para minimizar la contaminación del baño de fusión, las zonas a soldar se limpiaban bien antes de empezar (cepillado, rascado, desoxidado, etc.). En algunos casos, incluso se mecanizaba el cordón una vez terminado para eliminar irregularidades visibles.

4. Refuerzo mediante elementos adicionales

En estructuras críticas, sobre todo en el sector naval, se optó por combinar la soldadura con remaches espaciados o pequeños sobreespesores encima del cordón. Era una forma de asegurarse un extra de resistencia frente a posibles fallos.

5. Adaptación de generadores eléctricos

Como los equipos eléctricos no estaban pensados para soldar, muchos talleres modificaron generadores existentes para estabilizar la corriente. Se utilizaron convertidores o reguladores que permitían tener un arco más constante y manejable.

6. Protección anticorrosiva posterior

Dado que los cordones eran bastante vulnerables a la corrosión, especialmente en ambientes marítimos o industriales, se aplicaban pinturas, imprimaciones o aceites protectores justo después de soldar.

A pesar de todas estas limitaciones, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo terminó siendo clave en la transición desde las uniones tradicionales (remachado, forja u otros métodos mecánicos) hacia las primeras formas de soldadura moderna. Estas soluciones tempranas, aunque algo rudimentarias, hicieron posible que el proceso empezara a aplicarse en astilleros, fábricas y entornos militares donde la rapidez de fabricación y la reducción de peso eran esenciales.

Además, este periodo sentó las bases para el desarrollo de estándares, controles de calidad, procedimientos de inspección y formación específica. Con la llegada de los electrodos revestidos en la década de 1920 muchos de los problemas iniciales desaparecieron, pero la experiencia acumulada en esta etapa temprana fue imprescindible para que la soldadura terminara consolidándose como una tecnología industrial de pleno derecho.

3.4 Aplicaciones de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo en la Primera Guerra Mundial

Como ya se ha comentado, el estallido de la Primera Guerra Mundial provocó un aumento del uso de la soldadura, ya que se requería de forma urgente la unión de grandes cantidades de piezas metálicas. Por ello, las distintas potencias militares trataban de determinar cual de los nuevos procesos de soldadura desarrollados era el más adecuado. (3)

La soldadura por arco estaba atravesando un momento de auge y progreso importante, desarrollando nuevas mejoras y tratando de evolucionar los procesos ya existentes, dadas las necesidades de la época y la versatilidad, fiabilidad, ventaja económica y potencial automatización que aportaba la soldadura por arco eléctrico con respecto al resto de procesos existentes en el momento.

Aunque en el momento del estallido de la Primera Guerra Mundial (1914) ya se había patentado el electrodo metálico revestido (patentado por Oscar Kiellberg en 1904), elemento utilizado para la soldadura por arco eléctrico y que aportaba mayor estabilidad al arco, así como mayor protección del baño de soldadura de la atmósfera, lo que mejoraba la calidad de la unión, este método requería de un periodo de adaptación y estandarización industrial para poder ser implementado a gran escala, ya que aún no era confiable para cumplir la demanda y los requerimientos de un evento de tal envergadura como la Primera Guerra Mundial.

Por ello, el método de soldadura por arco eléctrico empleado de forma generalizada durante la Primera Guerra Mundial fue la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, que a pesar de que no era el método más avanzado desarrollado hasta el momento, ya estaba consolidado, establecido (inventado por Nikolay Slavyanov y Charles L. Coffin en 1888 y 1890 respectivamente) y era técnicamente más viable en el contexto bélico del momento. Así, se utilizó para la reparación y fabricación de elementos de transporte como barcos, aviones, carros de combate, el ferrocarril y otros vehículos emergentes como los submarinos, o elementos bélicos como artillería, minas torpedos y bombas.

Inglaterra fue la primera potencia en utilizar la soldadura por arco eléctrico durante la Primera Guerra Mundial, en este caso la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo. En este sentido, Inglaterra se encontraba inmersa en un esfuerzo bélico nunca antes visto que desencadenó en situaciones críticas tanto social como industrialmente. Una de ellas, fue la escasez de gas

industrial, lo que limitaba severamente los métodos de soldadura utilizados hasta el momento. Los talleres británicos, previamente al comienzo del conflicto bélico, utilizaban principalmente en sus uniones de materiales metálicos el remachado y la soldadura oxiacetilénica. Por parte del remachado, método confiable y más tradicional, ofrecía alta resistencia mecánica, pero requería de mucho tiempo y de una mano de obra muy especializada, siendo un proceso laborioso. Este proceso no podía acelerarse sin comprometer la fiabilidad del resultado, ya que cada pieza debía ser ensamblada de forma precisa y ajustarse mecánicamente. Por otro lado, la soldadura oxiacetilénica, como su nombre indica utiliza oxígeno y acetileno, este último se obtiene principalmente a partir de gas natural. Esto hace que, aunque la soldadura oxiacetilénica fuese más rápida que el remachado, era en gran medida dependiente del gas natural, lo que afectó bastante al proceso con la aparición de la guerra. (133)

Con el estallido de la Primera Guerra Mundial en 1914, Inglaterra se vio inmersa en una importante escasez de gas industrial. Esto afectó de forma directa a la soldadura oxiacetilénica, que dependía del gas para su uso. Esta escasez de gas en Inglaterra fue producida por distintas causas entrelazadas entre sí, aunque todas relacionadas con el conflicto bélico que acababa de comenzar. Alemania impuso bloqueos navales que, dada la situación geográfica de Inglaterra y que era el método más común para el transporte de mercancías en la época, limitaron en gran medida la importación de materias primas esenciales, entre las que se incluyen el carbón y el gas natural, elementos fundamentales para la producción de gas, ya sea para el consumo ciudadano o los procesos industriales (entre los que se incluye la obtención de acetileno). A su vez, la demanda de gas creció exponencialmente a causa de la guerra, con fábricas de municiones y armamento a pleno rendimiento, plantas de producción de acero, desarrollos químicos con fines bélicos y el transporte, necesitaban de este gas en escasez y pugnaban por los recursos disponibles. Debido a estas circunstancias, cada molécula de gas pasó a ser un recurso estratégico durante la guerra, y a causa de la dificultad de abastecimiento en todos los frentes industriales, se priorizó el uso de los recursos en los talleres, reduciendo de manera importante el uso de la soldadura oxiacetilénica. (133)

Debido a estas circunstancias, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo (BMAW) se transformó en la solución que la industria armamentística británica necesitaba. Este método comenzaba a emerger con popularidad ya que no requería del gas para su desarrollo, teniendo como ventaja la utilización únicamente de electricidad como fuente de energía para fundir y unir los metales. Desde ese momento, la soldadura BMAW fue adoptada inmediatamente por Reino Unido para el mantenimiento de la producción de armamento de forma que se pudiera garantizar que los frentes navales,

terrestres y aéreos no estuvieran desabastecidos. Asimismo, la producción fue incrementada rápidamente tras la adopción de esta técnica debido a que era un método mucho más rápido que el remachado y sin la compleja logística del oxiacetileno. (133)

Fue en este contexto que, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, Bare Metal Arc Welding (BMAW) se comenzó a utilizar en el Reino Unido para la fabricación de torpedos. Los torpedos Mark I, que eran empleados por submarinos y buques de superficie, se caracterizaban por un diseño complejo dotado de compartimentos para la pólvora, mecanismos de detonación y secciones cilíndricas. Aunque era necesaria una máxima precisión e integridad estructural, para garantizar la funcionalidad y un aumento de la resistencia, se realizaban varias pasadas de soldadura, haciendo que los cordones de soldadura fueran continuos, y minimizando el riesgo de fallos durante su uso y transporte. A partir de ello, se demostró que la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo podría ensamblar esas secciones más rápidamente que por medio de los remaches, disminuyendo considerablemente el tiempo empleado para su fabricación. (133)

A su vez, la creación de minas marinas destinadas a colocarse en zonas estratégicas del Canal de la Mancha y del Mar del Norte se beneficiaron de la BMAW ya que comenzaron también a producirse a través de esta metodología. Las carcasas eran ensambladas con mayor rapidez gracias a esta nueva técnica empleada siempre y cuando los ingenieros reforzaran esas uniones o remaches o efectuaran múltiples pasadas para reducir posibles defectos y garantizar una estructura sólida. (133)

La técnica también aportó modificaciones al armamento aéreo. La BMAW fue adoptada por Royal Flying Corps y la Royal Naval Air Service para armar bombas de aviación de pequeño y mediano calibre, similar a las bombas empleadas en ataques tácticos de 20 libras. Aunque los cordones soldados precisaban de una inspección cautelosa y en muchas situaciones tratamientos adicionales para garantizar su completa fiabilidad, se demostró que la rapidez de fabricación que tenían era mucho mayor y que el peso de los cordones soldados era mucho menor en comparación a las estructuras remachadas. Esto permitió un aumento notable en la capacidad operativa de los escuadrones aéreos británicos. (133)

Asimismo, el empleo del BMAW pasó a considerarse un factor que concedía a la industria británica la capacidad de adaptación a la guerra total. La falta de dependencia del gas dio la posibilidad de trabajar de manera continua por medio de turnos prolongados y reaccionar rápidamente a las exigencias cambiantes del frente. La mezcla de la carencia de gas, la presión de continuar la producción y los beneficios aportados del BMAW convirtieron a Inglaterra en

pionera en la ejecución de esta técnica para la fabricación del armamento, probando cómo la necesidad puede acelerar la innovación de las tecnologías en tiempos de guerra y conflicto y marcando un hito en la historia de ingeniería militar. (133)

La implementación de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo pronto evidenció su utilidad. La marina de guerra del Reino Unido (La Royal Navy), que tenía el reto de que su enorme flota operase de manera continua, pronto reconoció que la soldadura BMAW podía ser utilizada eficazmente en reparaciones urgentes que anteriormente habrían obligado a los barcos a permanecer inactivos durante extensos períodos de tiempo. Gracias al desarrollo de transformadores que permitían mantener un arco eléctrico más estable y la mejora en la calidad de los electrodos metálicos, los ingenieros navales se encontraron más capacitados para enfrentar inconvenientes que, hasta ese momento, su única solución habría sido mediante reemplazos totales o procesos prolongados de remachado. En este contexto, la soldadura BMAW emergió como una solución viable en lugar de largos periodos de inactividad de embarcaciones cruciales para la armada. (134)

Se realizaron varios procesos de reparaciones importantes mediante soldadura BMAW. Uno de los más notorios de este periodo ocurrió en Malta, en él, se halló que en un buque de guerra británico presentaba dos fisuras graves en el poste de popa. Se trataba de un elemento crucial del buque que sostenía el timón y aseguraba la maniobrabilidad del acorazado británico. Ante este hallazgo, los ingenieros inicialmente determinaron que era necesario reemplazar la pieza dañada, esto implicaría la retirada del barco de su actividad durante varios meses en un periodo en el que cualquier unidad era más que necesaria para la Royal Navy. No obstante, Gard, director de construcción británico ubicado en los astilleros de Malta y que se encargaba de la construcción de buques para la armada británica, decidió implementar una solución poco convencional, realizar la reparación mediante soldadura, en concreto soldadura por arco con electrodo metálico desnudo. Esta propuesta generó cierta controversia dado el riesgo de utilizar una soldadura incipiente y a la que no se le había dado tanta utilidad hasta el momento para este tipo de trabajos, pero finalmente obtuvo la aprobación de Sir Eustace Tennyson d'Eyncourt, director de construcción naval en el Almirantazgo británico (el Almirantazgo británico era el departamento gubernamental responsable del mando de la Marina Británica, la Royal Navy). (134)

La intervención se llevó a cabo a lo largo de seis semanas e implicó la utilización de cerca de seis quintales de metal utilizado en múltiples capas con el fin de aumentar el nivel de protección y fiabilidad de la unión, ya que como se ha mencionado anteriormente la soldadura BMAW era propensa a la corrosión, porosidad, e impurezas, por lo que se tenían que utilizar medios para proteger

la soldadura de los defectos producidos a causa de estos aspectos, como era aplicar varias capas de soldadura. El desafío no era únicamente de naturaleza técnica, sino que también se trataba de un desafío estratégico: En una reparación de tal magnitud, la reparación era considerada un riesgo y más debido a que la técnica aún estaba en proceso de consolidación. El resultado fue altamente positivo; después de 21 meses continuos de operación en el mar, la reparación se encontraba en condiciones óptimas, evidenciando que la soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico desnudo no solo tenía la capacidad de sustentar la producción industrial, sino que también podía extender la duración de los buques en activo. (134)

Este evento no fue aislado. Gard registró otras intervenciones importantes, como la fusión de componentes de acero colado en popa, la reparación del soporte del eje de un destructor, y el refuerzo de placas de revestimiento desgastadas por el uso. Todas estas acciones, llevadas a cabo en condiciones de conflicto bélico, demostraron que la soldadura BMAW, a pesar de sus limitaciones en términos de porosidad y resistencia inicial, podría transformarse en una herramienta fundamental para preservar la capacidad operativa de la marina británica.

No se trató de un caso aislado, Gard registró otras reparaciones importantes. Algunas de ellas fueron la soldadura de componentes de acero colado en popa, la reparación del soporte del eje de un buque destructor y refuerzos de placas de revestimiento desgastadas por su uso. Gracias a estas reparaciones se demostró que la soldadura BMAW, aunque tenía limitaciones de porosidad, corrosión y resistencia, podría ser fundamental para la marina británica permitiéndole disponer de la mayor capacidad operativa posible. (134)

Aunque muchas de las primeras reparaciones realizadas con la soldadura por arco y electrodo metálico desnudo ofrecieron resultados satisfactorios, no todas pudieron calificarse del mismo modo. Gard, que siguió de cerca estos trabajos y los dejó registrados con bastante detalle, mencionó también casos en los que el procedimiento no alcanzó el resultado esperado y los cordones no soportaron las exigentes tensiones del servicio naval. Aun así, la sensación general continuaba siendo positiva. La Royal Navy percibió que esta técnica incipiente merecía un estudio más profundo y que, con el tiempo y la investigación adecuados, podía abrirse la posibilidad (hasta ese momento remota) de construir un buque completamente soldado. Con esta intención, en agosto de 1917 dieron comienzo en Portsmouth una serie de ensayos especialmente diseñados para determinar hasta qué punto la soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico desnudo podía responder de forma fiable dentro de un entorno estrictamente naval. (134)

Las pruebas no se llevaron a cabo en un entorno controlado ni mucho menos en condiciones de laboratorio. Por el contrario, fueron diseñadas con la intención expresa de reproducir, en la medida de lo posible, el ambiente real de un astillero en plena guerra. Los ingenieros eran plenamente conscientes de que el comportamiento de los cordones no dependía únicamente de la calidad del material empleado, sino también de la habilidad del operario y de las circunstancias externas que rodeaban el trabajo. Por ello, se buscó que los ensayos incorporaran esa complejidad habitual del ámbito naval. (134)

Para ello se recurrió a electrodos fabricados por distintas empresas, con el fin de comparar su rendimiento, y se ejecutaron cordones en todas las posiciones que un soldador podía encontrarse en la práctica: horizontal, vertical y sobrecabeza. Los resultados confirmaron lo que ya se sospechaba: la soldadura en posición horizontal (downhand) era claramente la más fiable, motivo por el cual se propuso que las futuras estructuras destinadas a ser soldadas se proyectaran teniendo en cuenta dicha limitación. (134)

Las pruebas mecánicas mostraron que la resistencia a tracción de las uniones era, en términos generales, adecuada; sin embargo, los ensayos de flexión evidenciaron una ductilidad considerablemente inferior a la presentada por la chapa original. Además, y dado que la corrosión marina constituía uno de los principales factores de deterioro en cualquier unión metálica, varias probetas fueron sometidas previamente a inmersión en agua de mar con el propósito de evaluar cómo la salinidad influía en el comportamiento final de las soldaduras. (134)

Las conclusiones obtenidas a lo largo de este programa experimental quedaron reunidas en un conjunto de directrices que pasó a denominarse *Portsmouth Rules*, documento que no tardó en circular entre ingenieros navales y entre entidades de clasificación como Lloyd's Register. En él se establecían recomendaciones esenciales relativas al diseño, a la forma de ejecutar correctamente los cordones y a las limitaciones propias de la soldadura BMAW, lo que despertó un notable interés entre los constructores navales de todo el país. Lloyd's, consciente del potencial que esta técnica podía llegar a tener en la construcción naval si se comprendían bien sus particularidades, emprendió a su vez sus propias investigaciones, centradas principalmente en el comportamiento a fatiga de las uniones soldadas. (134)

El verdadero punto de inflexión se produjo cuando los resultados obtenidos en Portsmouth se llevaron a un ensayo a escala real, concretamente a la construcción de un tramo de seis metros de un bulge antitorpedo. Estos dispositivos, instalados en los costados de los acorazados con el fin de absorber parte de la energía de un torpedo antes de que alcanzara el casco principal (tal como se aprecia en la ilustración a continuación), constituían una

de las innovaciones defensivas más relevantes de la guerra naval moderna. Emplear soldadura en su ensamblaje suponía, por tanto, someter la técnica BMAW a una prueba decisiva.

El principal obstáculo no residió tanto en la resistencia mecánica de las uniones como en la complejidad de manipular y mantener en su posición los grandes planchones de acero que formaban la estructura. Para solventar esta dificultad se optó por un método híbrido: se dispuso una hilera de remaches muy espaciados cuya función era sostener provisionalmente las chapas, sobre las cuales se aplicó posteriormente el cordón de soldadura en junta solapada. Gard interpretó este procedimiento como una solución de transición, un paso intermedio entre el sistema tradicional basado íntegramente en el remachado y la aspiración, todavía lejana, de lograr estructuras navales completamente soldadas. (134)



Ilustración 36 – Bulge antitorpedo del HMS Glatton, aproximadamente 1916. (135)

Adicionalmente, el uso de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo comenzó a extenderse poco a poco hacia otras áreas de la construcción naval, como los submarinos, industria que todavía estaba en sus primeras etapas pero que ya tenía una importancia estratégica creciente. En los astilleros británicos de Chatham, se llevaron a cabo algunas de las primeras reparaciones documentadas en este tipo de embarcaciones utilizando esta técnica. Los trabajos se concentraron principalmente en componentes internos (como bridas de tuberías, conductos de ventilación o pequeños soportes

auxiliares) localizados en zonas donde las presiones eran relativamente bajas, de manera que no se comprometiera la integridad del casco resistente, que seguía dependiendo casi por completo del remachado. La finalidad de estas intervenciones era muy clara: devolver a los submarinos al servicio activo lo antes posible tras patrullas exigentes en el Mar del Norte, reduciendo de forma notable los tiempos de inactividad respecto a los métodos tradicionales de desmontaje y remachado. Aunque su empleo seguía siendo limitado y complementario, estas reparaciones demostraron que el arco eléctrico podía resultar eficaz en tareas concretas y sentaron las bases para su adopción progresiva en la construcción y mantenimiento de submarinos a lo largo de la década de 1920. (134)

El Reino Unido no limitó la confianza que tenía en la soldadura BMAW a reparaciones, pruebas experimentales o la fabricación de artefactos como bombas, torpedos y minas. El particular interés que siempre había mostrado el Almirantazgo de la Royal Navy por la resistencia de sus embarcaciones y la integración de nuevas tecnologías en la construcción naval, le llevó a la realización de pruebas prácticas con este nuevo método en la edificación de barcos auxiliares. Uno de los ejemplos más notorios fue la barcaza AC 1320, un barco de carga y servicio que fue transformado en un banco de ensayo para implementar la soldadura BMAW y los aprendizajes de la misma obtenidos en los test de Portsmouth, en su estructura principal. Estos experimentos evidenciaron que, aunque la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo no alcanzaba la resistencia y fiabilidad del remachado, dada su corrosión y porosidad, la técnica mostraba un potencial suficiente para ser considerada en proyectos más ambiciosos, gracias a distintos métodos que redujesen los defectos e impurezas generados con esta soldadura, como la aplicación de varias capas de soldadura y una limpieza exhaustiva. (133)

Lloyd's Register, la entidad de clasificación naval más reconocida en ese momento, se fijó en las pruebas que se realizaron en el barco de carga de mercancías AC 1320. La aprobación por parte de esta organización era fundamental para validar cualquier avance en la fabricación de embarcaciones. Lloyd's realizó un análisis de los resultados obtenidos y después de ello, optó por autorizar el empleo de la soldadura por arco (BMAW) en las principales estructuras del buque, aunque exclusivamente de manera experimental. Esto constituyó una aceptación cautelosa, pero contundente de la metodología, ya que implicaba que los astilleros podían integrar el método en proyectos específicos, siempre bajo una supervisión rigurosa y con inspecciones particulares. Este hecho supuso el primer reconocimiento oficial de la posibilidad de utilizar la soldadura por arco en el ámbito de la construcción naval lo que implicó el comienzo de una transición histórica desde el uso

predominante del remachado hacia las uniones soldadas que, años más adelante, se establecerían como el estándar. (133)

Paralelamente, en la otra parte del océano Atlántico, los Estados Unidos empezaban a investigar las oportunidades que ofrecía la soldadura por arco (BMAW). En 1915, la compañía Geary Boiler Works, ubicada en Ashtabula, Ohio, fabricó la barcaza conocida como Dorothea M. Geary. (136) Este buque, en el que para su construcción fueron utilizados equipos de Lincoln Electric, fue reconocido como la primera embarcación con un casco completamente soldado a través de la soldadura por arco eléctrico. Este innovador proyecto, aunque se trataba de un buque de estructura muy sencilla, facilitó la construcción de un remolcador de 36 pies de longitud de manera más ágil y eficiente en comparación con métodos más convencionales como el remachado, evidenciando el potencial de la soldadura por arco eléctrico para usos tanto comerciales como militares. (137)

Aunque ya se habían dado algunos pasos en la dirección correcta, lo cierto es que la soldadura por arco seguía despertando bastantes dudas entre los ingenieros navales estadounidenses. La mayoría la veía como un recurso secundario, útil para arreglos puntuales o trabajos de apoyo, pero poco más. Esa prudencia empezó a reducirse de golpe en 1917, a raíz de un problema que, irónicamente, no surgió en plena construcción naval, sino en una situación completamente inesperada relacionada con los buques mercantes alemanes que llevaban años detenidos en puertos de Estados Unidos. Desde 1914, por cumplir estrictamente con la neutralidad, el país había mantenido inmovilizados a decenas de barcos alemanes, de modo que, cuando EE. UU. entró finalmente en la guerra el 6 de abril de 1917, toda esa flota pasó a ser de repente un activo estratégico. Esos buques podían aliviar de inmediato la enorme escasez de tonelaje que sufría la marina mercante aliada y que complicaba el traslado urgente de tropas y suministros a Europa. (138)

El problema surgió cuando las autoridades descubrieron lo que las tripulaciones alemanas habían hecho antes de abandonar los barcos: siguiendo instrucciones enviadas desde Berlín, habían saboteado a conciencia las calderas, las máquinas y buena parte de los sistemas auxiliares de 109 buques para asegurarse de que no pudieran ser utilizados por el enemigo. Los inspectores estadounidenses se encontraron con un panorama desolador: calderas reventadas, tuberías partidas, válvulas arrancadas, bombas inservibles y piezas clave destrozadas sin ningún miramiento. A primera vista, aquello parecía trabajo para varios meses de reparaciones convencionales, algo completamente incompatible con la urgencia del momento, porque el recién creado United States Shipping Board necesitaba esos barcos navegando lo antes posible, literalmente en cuestión de semanas. (138)

Ante esta situación tan extrema, se optó por una solución técnica que, hasta ese momento, nadie había contemplado en serio: recurrir a equipos de ingenieros civiles procedentes de talleres ferroviarios (según informes posteriores, algunos vinculados a la Rock Island Railroad) y permitirles reparar los daños utilizando soldadura por arco con electrodo metálico desnudo. Esta decisión era bastante arriesgada, porque suponía aplicar un método que hasta ese momento solo se usaba para trabajos menores a la reconstrucción de componentes sometidos a altas tensiones y temperaturas. Aun así, los soldadores se pusieron manos a la obra y trabajaron sin descanso sobre calderas, conductos de vapor y partes fracturadas de las máquinas, rellenando con cordones de metal todo aquello que los sabotadores habían destruido. Lo que normalmente habría requerido fabricar piezas nuevas desde cero y recurrir a semanas de mecanizado, se resolvió depositando metal fundido sobre las zonas afectadas y reconstruyendo las superficies directamente en los barcos. (138)

Contra todo pronóstico, el resultado fue mejor de lo que se esperaba. La rapidez con la que se lograron restaurar estos buques resultó realmente sorprendente. En apenas unas semanas, muchos ya estaban preparados para cruzar el Atlántico y transportar tropas, suministros y municiones. Entre todos ellos, uno de los más destacados fue el *Mercury*, que anteriormente había sido conocido como *Barbarossa*. Su reparación mediante soldadura por arco BMAW se convirtió en un caso emblemático, porque demostró que la técnica podía aplicarse con éxito a maquinaria crítica sometida a altas presiones y temperaturas. Una vez reparado, el *Mercury* pasó por pruebas en el mar de 48 horas, durante las cuales se verificó tanto su plena operatividad como la resistencia y eficacia de las uniones soldadas, generando así una confianza creciente en el uso de esta técnica. Gracias a todas estas reparaciones, se calcula que más de medio millón de soldados estadounidenses viajaron a Europa en estos barcos que, sin esta intervención acelerada bajo la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, habrían permanecido inservibles durante meses. (138)

A partir de ese punto, la visión estadounidense sobre la soldadura por arco cambió por completo. Lo que antes de 1917 había sido un procedimiento experimental, limitado a casos aislados como el de la barcaza *Dorothea M. Geary*, pasó a convertirse en un recurso estratégico tanto para la industria naval como para las agencias federales involucradas en el esfuerzo bélico. Las reparaciones realizadas en Nueva York marcaron así un antes y un después, y terminaron impulsando una adopción masiva del proceso en las décadas siguientes. (138)

Volviendo de nuevo a la industria naval británica, tras la aceptación experimental de la soldadura por arco (BMAW) en el AC 1320, se comenzó a

plantear hasta dónde podía llevar esta innovación. La motivación no era únicamente técnica: la experiencia acumulada durante la Primera Guerra Mundial había dejado claro que se necesitaban métodos de construcción más rápidos y eficientes, capaces de reducir tiempos y costos sin poner en riesgo la integridad de los buques. Fue en este contexto cuando surgió la idea de construir un carguero con el casco completamente soldado, un proyecto que se formalizó en 1918 con la aprobación de los planos y la planificación de la obra en los astilleros Cammell Laird & Co., en Birkenhead. Este buque, que posteriormente sería bautizado como Fullagar, se muestra en la ilustración a continuación y se botó en febrero de 1920 lo que representó la primera aplicación a gran escala de soldadura BMAW en un casco íntegramente soldado, consolidando así la transición iniciada con las pruebas del AC 1320. (134)

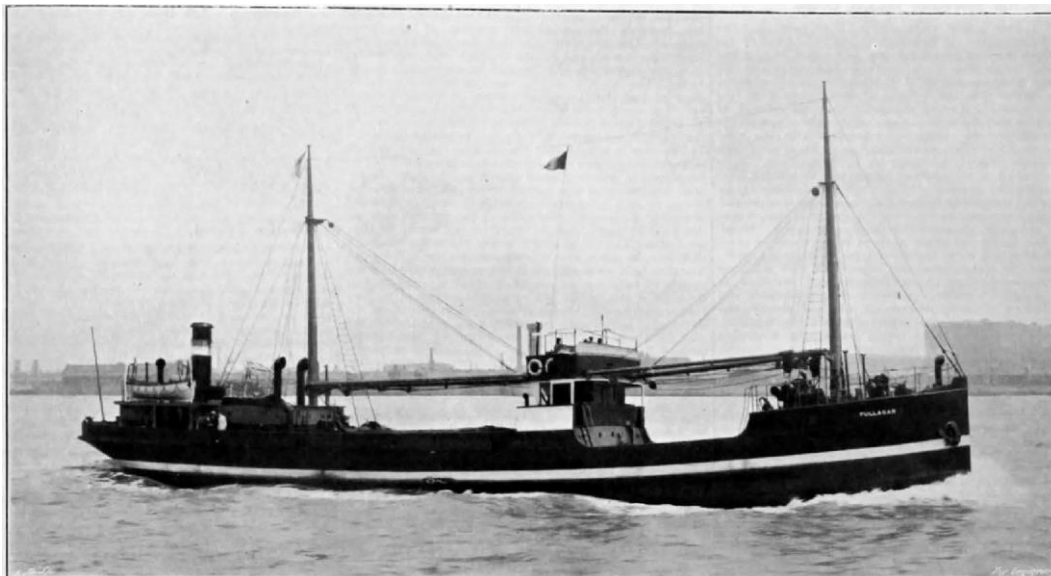


Ilustración 37 – Buque Fullagar. 1920 (139)

Diseñar y construir el Fullagar supuso un auténtico desafío técnico. La soldadura por arco con electrodo metálico desnudo exigía un control muy cuidadoso de la temperatura, de la velocidad de avance y de la continuidad de los cordones para garantizar la estanqueidad del casco frente a la presión del agua y a las fuerzas mecánicas que se generaban durante la navegación. A diferencia de las uniones remachadas, que dependían de la compresión entre planchas y de la redundancia de los remaches, la BMAW requería una penetración completa y uniforme del metal fundido para evitar grietas, porosidades o cualquier defecto que pudiera comprometer la seguridad del buque. Los ingenieros británicos tuvieron que desarrollar procedimientos sistemáticos de soldadura, con pasadas de prueba y protocolos de inspección tanto visual como destructiva, estableciendo así estándares que más tarde servirían de referencia en otros astilleros. (134)

El Fullagar también puso a prueba la logística industrial de la época. Construir un casco totalmente soldado no solo requería soldadores expertos, sino un suministro constante de electrodos de calidad uniforme, energía eléctrica confiable y talleres preparados para manipular planchas de acero de gran tamaño. Para ello, Cammell Laird reorganizó sus líneas de producción, introduciendo estaciones de soldadura fijas, turnos prolongados y protocolos de control de calidad que garantizaran la consistencia de todas las uniones. Por primera vez, la soldadura dejó de ser un recurso limitado a reparaciones o estructuras secundarias y se aplicó de manera integral en un casco completo, bajo criterios estrictamente profesionales. (134)

Desde un punto de vista histórico, el Fullagar simbolizó la consolidación de la soldadura por arco en la construcción naval británica. Su éxito fue documentado ampliamente por Lloyd's Register, que evaluó tanto la integridad estructural del buque como la validez de las uniones soldadas, confirmando que un casco totalmente soldado podía soportar las exigencias del transporte marítimo. Este reconocimiento oficial no solo avaló la técnica, sino que generó confianza en la industria y permitió que, en los años siguientes, se aplicara a proyectos más grandes y complejos, incluyendo buques mercantes de mayor tonelaje e incluso embarcaciones militares. (134)

Aunque no era un buque de guerra —medía aproximadamente 150 pies de eslora y tenía un registro bruto de 398 toneladas, siendo un carguero costero mercante—, la importancia técnica del Fullagar superaba ampliamente su tamaño. Demostró que era posible eliminar por completo los remaches, reduciendo así el peso del casco, acelerando los tiempos de construcción y disminuyendo el riesgo de filtraciones. Además, permitió experimentar con la disposición de las planchas, la secuencia de soldadura y la combinación de pasadas de cordón, conocimientos que más tarde se aplicarían en la construcción de buques más grandes y complejos. (134)

El impacto del Fullagar tuvo también un valor educativo y profesional considerable. Los soldadores que trabajaron en su construcción adquirieron habilidades avanzadas en BMAW, y los astilleros documentaron detalladamente los procedimientos, contribuyendo a la elaboración de manuales técnicos y guías de trabajo. Este conocimiento se difundió rápidamente entre otros astilleros británicos y extranjeros, acelerando la estandarización de la soldadura por arco en la construcción naval. Gracias a esta experiencia, durante la década de 1920 y en los años posteriores, la soldadura integral de cascos se consolidó como una práctica reconocida y aceptada, marcando un antes y un después en la historia de la ingeniería naval. (134)

Mientras todas estas innovaciones iban transformando la construcción naval en Reino Unido y Estados Unidos, en el continente europeo empezó a desarrollarse un escenario completamente distinto en el que la soldadura por arco fue ganando protagonismo casi sin que nadie lo previera, la industria aeronáutica alemana. A diferencia de lo que ocurría en los astilleros, donde el método BMAW se aplicaba sobre todo en cascos, refuerzos y reparaciones derivadas del combate, en Alemania el interés por el arco eléctrico surgió directamente dentro de los talleres de aviación, un sector mucho más joven y dinámico, que además no arrastraba las mismas inercias productivas que la construcción naval. Fue precisamente en este entorno, marcado por la presión constante de la guerra y por la necesidad de aligerar estructuras para mejorar prestaciones, donde el ingeniero neerlandés Anthony Fokker comenzó a probar la soldadura por arco en los fuselajes de los aviones de combate fabricados para el Imperio Alemán. (133)

Hay que tener presente que, en aquellos años, la idea de aplicar técnicas de soldadura en aeronaves no era ni mucho menos evidente. Antes de 1914, prácticamente toda la industria aeronáutica se basaba en estructuras de madera y tela, con uniones atornilladas o reforzadas con colas naturales, y solo de forma gradual empezaron a utilizarse tubos de acero para fuselajes y trenes de aterrizaje. Estos tubos, cuando se incorporaban, solían unirse mediante manguitos roscados, abrazaderas metálicas o pequeñas piezas forjadas que se remachaban a mano. Los procedimientos de unión mediante calor, como la soldadura, se miraban con bastante recelo, principalmente por el riesgo de fragilizar los aceros finos o de deformar la estructura hasta el punto de alterar la geometría del fuselaje. Aun así, la realidad del conflicto hizo que muchos fabricantes empezaran a buscar métodos más rápidos, ligeros y adaptables a una producción en serie que ya era indispensable a medida que el ritmo del combate aéreo aumentaba. (74)

Fue en este ambiente de búsqueda de eficiencia donde Fokker vio un potencial enorme en el uso del arco eléctrico. A partir de 1915, cuando sus talleres en Schwerin comenzaron a recibir encargos crecientes de aviones de combate, empezó a introducir la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo en la fabricación de los fuselajes tubulares. En aviones como el Fokker Eindecker que se muestra en la ilustración a continuación, y, más adelante, la serie Fokker D, los operarios generaban el arco con electrodos sin revestimiento y depositaban directamente el material sobre los tubos, creando uniones continuas y sorprendentemente ligeras que sustituían métodos más tradicionales como las abrazaderas o los manguitos roscados. Este cambio permitió reducir peso, simplificar procesos y acelerar la producción de manera notable, hasta convertirse en una de las innovaciones más características de

la industria aeronáutica alemana durante la Primera Guerra Mundial, incluso aunque el método no estuviera realmente estandarizado. (140)



Ilustración 38 – Fokker Eindecker I, aproximadamente 1915. (141)

La decisión de Fokker de incorporar la soldadura BMAW no respondía solo a motivos técnicos, sino también a razones estratégicas. El arco eléctrico permitía eliminar configuraciones pesadas basadas en piezas forjadas y, con ello, reducir el peso total del fuselaje, algo crucial para mejorar la maniobrabilidad y la capacidad de ascenso de los cazas. Además, la velocidad de montaje aumentaba de forma considerable: uniones que antes requerían mecanizado, ajuste manual y fijación mediante pernos podían resolverse en unos minutos con un operario experimentado. Esto tuvo un impacto directo en la producción, permitiendo a Fokker entregar aviones a un ritmo muy superior al de otros fabricantes. Esta agilidad se convirtió en una ventaja estratégica durante los años centrales de la guerra, cuando las pérdidas eran tan elevadas que resultaba imprescindible reponer aeronaves continuamente. (140)

Con todo, la introducción de la soldadura BMAW en aviación no estuvo exenta de dudas y controversias. Las autoridades técnicas alemanas, así como parte de la ingeniería militar, mostraron cierta desconfianza hacia la consistencia metalúrgica de los cordones, temiendo porosidades, tensiones residuales o incluso grietas en tubos de pequeño diámetro sometidos a fuertes cargas dinámicas. Fokker, consciente de esta preocupación, desarrolló procedimientos internos de control que incluían someter las uniones a cargas de flexión y tracción para demostrar que, aunque el proceso careciera de

revestimiento y protección gaseosa, era capaz de producir juntas con la resistencia necesaria para aeronaves ligeras. Y, aunque los informes oficiales no reconocieron estas técnicas como estándar, la experiencia acumulada en los talleres bastó para que su uso se mantuviera durante toda la contienda, dejando claro que el método funcionaba en estructuras de baja masa. (113)

En este sentido, el empleo experimental de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo en los talleres de Fokker representó un episodio singular dentro de la historia temprana de la soldadura, ya que supuso la primera aplicación sistemática de este tipo de uniones en aviones de combate. Su incorporación en los fuselajes alemanes demostró que la soldadura por arco podía emplearse más allá del ámbito naval o industrial pesado. Alemania, incluso sin contar con equipos demasiado avanzados ni con una infraestructura eléctrica comparable a la británica o la estadounidense, consiguió adelantarse en un terreno inesperado, el uso del arco eléctrico como una herramienta más dentro de la innovación aeronáutica. (113)

En resumen, la experiencia acumulada durante la Primera Guerra Mundial pone de manifiesto cómo la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo (BMAW) se convirtió en una herramienta prácticamente imprescindible en múltiples frentes de la producción y la reparación militar. La escasez de recursos a causa de la guerra, la presión por acelerar la fabricación de armamento, reparar buques dañados, reforzar estructuras navales y optimizar la construcción de aeronaves impulsó la adopción de esta tecnología más allá de sus aplicaciones tradicionales, consolidando un cambio profundo en la ingeniería industrial. Desde los primeros experimentos en fuselajes de aviones y torpedos, hasta su integración en cascos de barcos y en reparaciones de buques y submarinos, la BMAW permitió combinar rapidez, precisión y eficacia en contextos donde los métodos convencionales resultaban claramente insuficientes. Este periodo puso de relieve no solo la versatilidad de la soldadura por arco, sino también cómo la presión de la guerra podía obligar a innovar, fomentando el desarrollo de procedimientos, estándares y habilidades que, décadas después, permitirían su adopción sistemática y transformar de manera definitiva la construcción naval, aeronáutica y militar.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los capítulos anteriores se ha recorrido el contexto histórico, tecnológico e industrial que precede y acompaña a la Primera Guerra Mundial, así como el desarrollo de la soldadura por arco eléctrico y, en particular, de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo. A partir de toda esta información, en este apartado se presentan y analizan de forma conjunta los principales resultados obtenidos, relacionando el avance de la soldadura por arco con las necesidades industriales y militares del periodo 1870-1919, y poniendo de manifiesto el papel que desempeñó este proceso en la evolución de los medios de transporte y en la configuración de la producción industrial del siglo XX.

4.1 Relación entre el desarrollo tecnológico y la aparición de la soldadura por arco eléctrico

Tal y como se ha expuesto previamente, la Segunda Revolución Industrial supuso un aumento muy significativo en el uso de estructuras metálicas en sectores como el naval, el ferroviario, la construcción de puentes e infraestructuras de transporte y, ya a comienzos del siglo XX, la incipiente industria aeronáutica. La generalización del acero como material estructural, gracias a procesos como el convertidor Bessemer, hizo posible producir grandes cantidades de perfiles y chapas a un coste razonable, pero al mismo tiempo generó un nuevo problema técnico: la necesidad de unir esos elementos metálicos de manera rápida, resistente y fiable.

Hasta entonces, los métodos de unión más habituales eran el remachado y la soldadura por forja. Ambos procedimientos habían demostrado su eficacia, pero presentaban limitaciones claras cuando se trataba de estructuras cada vez más grandes y complejas. El remachado requería una enorme cantidad de mano de obra, incrementaba el peso de las estructuras y obligaba a realizar perforaciones que debilitaban parcialmente el material base. La soldadura por forja, por su parte, era un proceso lento, muy dependiente de la habilidad del operario y difícil de aplicar de forma repetitiva en producciones de gran volumen.

En este contexto, los avances en electricidad y en metalurgia hicieron posible el desarrollo de la soldadura por arco eléctrico. A finales del siglo XIX y principios del XX se fueron sucediendo las aportaciones de diferentes inventores, desde el uso de electrodos de carbón hasta la introducción de electrodos metálicos consumibles. La soldadura por arco comenzó así a configurarse como una alternativa capaz de dar respuesta a las necesidades de la nueva industria: permitía uniones continuas, reducía el número de piezas y elementos auxiliares

(como remaches), disminuía el peso total y era potencialmente más rápida que los métodos tradicionales.

De este modo, puede afirmarse que la soldadura por arco eléctrico no surgió de manera aislada, sino como consecuencia directa del desarrollo tecnológico de la Segunda Revolución Industrial. El incremento del tamaño de las estructuras metálicas, la complejidad creciente de los medios de transporte y la búsqueda de procesos más económicos y eficientes crearon el entorno idóneo para su aparición y posterior adopción.

4.2 La Primera Guerra Mundial como acelerador del uso de la soldadura por arco eléctrico

Sobre ese escenario de transformación industrial se produce el estallido de la Primera Guerra Mundial. Este conflicto supuso un salto cualitativo en la escala y la intensidad del uso de medios materiales: barcos, trenes, carros de combate, artillería, aviones y, en general, todo tipo de equipos militares debían fabricarse y repararse con rapidez para sostener un esfuerzo bélico prolongado.

La guerra generó, por tanto, una presión extraordinaria sobre la industria pesada y los sistemas de transporte. Las flotas navales sufrían daños constantes, las locomotoras y vagones se veían sometidos a un uso intensivo, y la aviación empezaba a adquirir un protagonismo creciente, pasando de un papel meramente de reconocimiento a misiones de combate, bombardeo y apoyo aéreo. Esta situación hizo todavía más evidente la necesidad de contar con métodos de unión de estructuras metálicas que fuesen más rápidos y eficientes que los disponibles hasta ese momento.

En este contexto, la soldadura por arco eléctrico se reveló como una herramienta de gran utilidad. En los astilleros se demostró que era posible realizar reparaciones estructurales en cascos de buques con mayor rapidez que mediante remachado. En los talleres ferroviarios se utilizó para reparar elementos de vías, locomotoras y vagones. Y en el ámbito aeronáutico, el desarrollo de fuselajes metálicos, especialmente en determinados modelos alemanes, puso de manifiesto que la soldadura por arco podía emplearse también en componentes sometidos a esfuerzos dinámicos y exigencias de peso muy estrictas.

Puede concluirse, por tanto, que la Primera Guerra Mundial actuó como un auténtico “acelerador” del uso de la soldadura por arco eléctrico. La urgencia bélica obligó a explotar las posibilidades de este proceso, incluso cuando todavía no estaba completamente perfeccionado ni estandarizado, y al mismo

tiempo puso de relieve sus limitaciones, orientando las líneas de mejora sobre las que se trabajaría en las décadas posteriores.

4.3 Disponibilidad real de procesos de soldadura por arco antes y durante la guerra

En los capítulos anteriores se ha descrito la evolución de los distintos tipos de soldadura por arco eléctrico. A comienzos del siglo XX ya se había desarrollado el electrodo metálico consumible y se había patentado el electrodo metálico revestido. Sin embargo, que un proceso esté técnicamente inventado no implica necesariamente que esté listo para ser implantado de forma masiva en la industria, y menos aún en el contexto extremo de una guerra mundial.

En el periodo inmediatamente anterior al conflicto, y durante la propia guerra, coexistían dos grandes variantes de soldadura por arco metálico:

- Soldadura por arco con electrodo metálico desnudo.
- Soldadura por arco con electrodo metálico revestido.

4.3.1 Soldadura por arco con electrodo metálico desnudo

La soldadura por arco con electrodo metálico desnudo fue el método que alcanzó un mayor grado de implantación práctica antes de 1914. La utilización de un electrodo metálico que actuaba simultáneamente como fuente de arco y material de aporte permitía realizar uniones de forma relativamente sencilla, con equipos que podían construirse a partir de la tecnología eléctrica ya disponible en la época.

Este proceso presentaba varias ventajas desde el punto de vista industrial y logístico:

- El electrodo desnudo era sencillo de fabricar y no requería materiales adicionales para revestimientos.
- La maquinaria necesaria para generar el arco era robusta y podía adaptarse a talleres muy distintos, incluidos astilleros y reparaciones de campaña.
- El procedimiento, aunque exigía cierta habilidad, era más accesible que otros métodos más avanzados que todavía estaban en fase experimental.

Por todo ello, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo se consolidó como el proceso de referencia allí donde se necesitaba una técnica de unión metálica rápida y relativamente fiable, incluso antes del estallido de la guerra.

4.3.2 Soldadura por arco con electrodo metálico revestido

En paralelo, el desarrollo del electrodo metálico revestido representó un avance muy importante desde el punto de vista teórico. El revestimiento del electrodo permitía estabilizar el arco, proteger el baño de fusión frente a la atmósfera y generar una escoria que mejoraba las propiedades mecánicas de la unión. En consecuencia, la soldadura por arco con electrodo metálico revestido presentaba un potencial notable para obtener cordones de mayor calidad y con menos defectos internos.

Sin embargo, antes y durante la Primera Guerra Mundial este potencial no llegó a traducirse todavía en una implantación industrial comparable a la del proceso con electrodo desnudo. El motivo principal fue que la fabricación de electrodos revestidos requería un mayor grado de desarrollo tecnológico y de estandarización. Era necesario controlar cuidadosamente la composición de los revestimientos, garantizar un suministro constante y formar al personal para utilizar adecuadamente el nuevo procedimiento.

Por ello, pese a que el electrodo revestido ya había sido patentado antes del inicio de la guerra, su aplicación masiva no era aún viable. La técnica no estaba lo suficientemente madura ni resultaba lo bastante fiable para responder a las exigencias de una producción bélica a gran escala. En consecuencia, durante la Primera Guerra Mundial se siguió empleando de manera predominante la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo, que ofrecía una fiabilidad y una disponibilidad mayores en aquellas circunstancias.

4.4 Ventajas operativas de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo en el contexto bélico

La elección de la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo como método principal durante la Primera Guerra Mundial no fue fruto del azar, sino el resultado de una combinación de factores técnicos, industriales y logísticos. Aunque la variante con electrodo revestido podía considerarse más avanzada desde el punto de vista metalúrgico y en la protección frente a la corrosión, el proceso con electrodo desnudo ofrecía una serie de ventajas decisivas para su utilización en un contexto de guerra.

En primer lugar, la sencillez de fabricación de los electrodos desnudos permitía producir grandes cantidades de consumibles en un tiempo relativamente corto. La industria metalúrgica ya estaba habituada a trabajar con alambres y barras metálicas, de modo que la adaptación a la producción de electrodos para soldadura no requería transformaciones profundas. Por el contrario, la fabricación de electrodos revestidos implicaba desarrollar y controlar formulaciones específicas de revestimiento, algo que todavía no estaba plenamente resuelto.

En segundo lugar, los equipos necesarios para realizar soldadura por arco con electrodo metálico desnudo eran robustos y relativamente simples. Podían instalarse en astilleros, talleres ferroviarios, fábricas de armamento o incluso en instalaciones de campaña con recursos limitados. Esta robustez constituía una ventaja clave frente a otros procesos más sofisticados, que exigían una infraestructura eléctrica y unos consumibles menos accesibles en plena guerra.

En tercer lugar, la soldadura con electrodo desnudo, aunque más sensible a factores como la humedad, la porosidad o las corrientes de aire que el electrodo revestido, resultaba bastante práctica en situaciones de guerra. Su simplicidad permitía llevar a cabo reparaciones o uniones en buques, vehículos o distintas estructuras incluso con recursos limitados y sin necesidad de un entorno totalmente controlado. Por eso, aunque este tipo de electrodo exigía un cuidado mayor para evitar defectos, su disponibilidad inmediata y la facilidad con la que se podía manejar lo hacían una opción viable cuando la rapidez y la continuidad del servicio eran lo más importante.

Por último, el proceso con electrodo desnudo, aunque generaba más salpicaduras y presentaba una mayor tendencia a la oxidación del baño, ofrecía una velocidad de deposición y una capacidad de aportación de material adecuadas para realizar cordones largos y reparaciones de cierta entidad estructural. Desde la perspectiva de la urgencia bélica, en muchos casos se priorizaba la rapidez y la continuidad del servicio por encima de la perfección metalúrgica de la unión.

En resumen, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo reunía una serie de ventajas operativas (simplicidad, disponibilidad, robustez y tolerancia a condiciones difíciles) que la convirtieron en la opción más adecuada para la industria y las fuerzas armadas durante la Primera Guerra Mundial.

4.5 Aplicaciones de la soldadura por arco eléctrico durante la Primera Guerra Mundial

A partir de la información recopilada puede apreciarse que la soldadura por arco eléctrico se aplicó de forma especialmente significativa en tres grandes ámbitos: la industria naval, la aviación y el ferrocarril, además de otros medios de transporte y elementos bélicos.

4.5.1 Industria naval

En el sector naval, la soldadura por arco comenzó a utilizarse tanto en la construcción de nuevos buques como, sobre todo, en la reparación de cascos dañados. La aparición de los primeros barcos con cascos completamente soldados, como el Fullagar en el Reino Unido, supuso un hito técnico que evidenciaba la viabilidad de emplear la soldadura por arco eléctrico en estructuras sometidas a esfuerzos muy exigentes.

No obstante, la contribución más importante de la soldadura en este ámbito no fue únicamente la construcción, sino la capacidad para efectuar reparaciones rápidas y localizadas. Los enfrentamientos navales y los ataques con minas o torpedos ocasionaban daños que debían subsanarse con la mayor celeridad posible para devolver los buques al servicio. La soldadura por arco permitía sustituir chapas dañadas, reforzar zonas debilitadas y cerrar grietas de forma más ágil que el remachado, reduciendo el tiempo de permanencia del barco en dique seco.

Esta combinación de rapidez y capacidad de reparación contribuyó de manera decisiva a mantener la operatividad de las flotas durante el conflicto, y consolidó la percepción de la soldadura por arco como una herramienta indispensable en los astilleros modernos.

4.5.2 Aviación

La aviación militar experimentó durante la Primera Guerra Mundial una transformación profunda. Los primeros aviones, contruidos principalmente con estructuras de madera y recubrimientos de tela, evolucionaron progresivamente hacia configuraciones más robustas, en las que se empezaron a introducir elementos metálicos.

En este proceso, modelos como el Junkers J1, considerado uno de los primeros aviones metálicos, y sus sucesores, demostraron que era posible integrar fuselajes fabricados en metal utilizando técnicas de soldadura. La introducción de estructuras soldadas permitió mejorar la resistencia de la aeronave, aprovechar mejor las propiedades del material y abrir el camino a configuraciones que serían fundamentales en décadas posteriores.

La soldadura por arco, aplicada en este contexto, respondía a dos necesidades simultáneas: por un lado, se requerían uniones suficientemente resistentes para soportar las cargas aerodinámicas y estructurales; por otro, era imprescindible reducir el peso, motivo por el cual el remachado comenzaba a resultar menos atractivo, al introducir elementos adicionales y zonas de concentración de tensiones.

En consecuencia, aunque la soldadura no desplazó por completo otros métodos de unión durante la guerra, sí permitió dar los primeros pasos hacia el avión completamente metálico, convirtiéndose en una tecnología clave para la evolución de la aviación militar y civil del siglo XX.

4.5.3 Ferrocarril y otros medios de transporte

El ferrocarril fue otro de los pilares logísticos de la Primera Guerra Mundial. Las redes ferroviarias se utilizaron intensivamente para transportar tropas, armamento, suministros y material de todo tipo hacia los frentes de combate. Esta utilización intensiva provocó un desgaste notable en vías, locomotoras y vagones.

A principios del siglo XX ya se habían empezado a incorporar procesos de soldadura, tanto por gas oxiacetilénico como por arco eléctrico, a la fabricación y reparación de elementos ferroviarios. Durante el conflicto, estas técnicas resultaron esenciales para mantener en servicio la infraestructura de transporte. La soldadura permitió reconstruir tramos dañados, reforzar componentes sometidos a fatiga y realizar ajustes y modificaciones en tiempos muy reducidos.

Además del ferrocarril, la soldadura por arco también se empleó en otros vehículos y sistemas bélicos, como carros de combate, submarinos, piezas de artillería, minas, torpedos y bombas. En todos estos casos, la posibilidad de unir y reparar elementos metálicos de manera rápida y relativamente fiable supuso una ventaja considerable en términos de producción y mantenimiento.

4.6 Análisis comparativo entre la soldadura con electrodo metálico desnudo y con electrodo metálico revestido

A la luz de lo expuesto, es posible realizar un análisis comparativo entre las dos variantes principales de soldadura por arco eléctrico disponibles en el periodo estudiado: la soldadura con electrodo metálico desnudo y la soldadura con electrodo metálico revestido.

Desde el punto de vista estrictamente técnico, la soldadura con electrodo revestido ofrecía una serie de ventajas potenciales: el revestimiento generaba gases protectores y escoria que reducían el contacto del baño de soldadura con la atmósfera, disminuyendo la oxidación y la aparición de porosidad; el arco resultaba más estable; y la calidad final del cordón podía ser superior, con mejores propiedades mecánicas y menos defectos internos.

Sin embargo, todas estas ventajas se encontraban en una fase inicial de desarrollo durante la Primera Guerra Mundial. La fabricación de electrodos revestidos no estaba aún plenamente normalizada, la disponibilidad de consumibles era limitada y el procedimiento requería una mayor formación específica de los operarios. Además, el coste de producción era superior, lo que dificultaba su adopción en grandes volúmenes en un periodo de alta demanda.

Por el contrario, la soldadura con electrodo metálico desnudo presentaba limitaciones evidentes en términos de protección del baño y estabilidad del arco, pero se encontraba ya en un estado de madurez suficiente como para ser utilizada de forma generalizada. La sencillez de fabricación, la amplia disponibilidad de materiales, la compatibilidad con equipos robustos y la menor exigencia de estandarización en esa fase hicieron que este proceso resultara más apropiado para el contexto bélico.

En consecuencia, durante la Primera Guerra Mundial se produjo una situación paradójica: el proceso tecnológicamente más avanzado (electrodo revestido) no era todavía el más útil, mientras que el proceso más sencillo (electrodo desnudo) resultó ser el más eficaz desde la perspectiva industrial y logística. Esta elección no se debió a una comparación abstracta de calidad, sino a la combinación real de factores disponibles en ese momento histórico: madurez técnica, capacidad de producción, coste, formación de los operarios y fiabilidad en condiciones extremas.

4.7 Influencia de la Primera Guerra Mundial en la evolución posterior de la soldadura por arco eléctrico

La experiencia acumulada durante la Primera Guerra Mundial tuvo un impacto decisivo en la evolución posterior de la soldadura por arco eléctrico a lo largo del siglo XX. El conflicto demostró de forma práctica que la soldadura era una herramienta indispensable para la construcción y reparación de estructuras metálicas en un entorno industrial avanzado. Al mismo tiempo, puso de manifiesto las carencias de los procesos disponibles y señaló con claridad las áreas en las que era necesario avanzar.

En los años posteriores a la guerra se produjo un proceso de consolidación y profesionalización de la soldadura. La creación de organizaciones como la American Welding Society contribuyó a la estandarización de procedimientos, la definición de requisitos de calidad, la normalización de consumibles y la certificación de soldadores. Paralelamente, empresas especializadas en equipos y consumibles de soldadura desarrollaron soluciones más sofisticadas y fiables, apoyándose en la experiencia adquirida durante el conflicto.

Por otra parte, las limitaciones observadas en la soldadura con electrodo metálico desnudo impulsaron el perfeccionamiento del electrodo revestido y, más adelante, el desarrollo de nuevos procesos de soldadura por arco, como la soldadura por arco sumergido, la soldadura TIG y la soldadura MIG/MAG. Estos avances retomaban problemas ya detectados durante la guerra (protección del baño, estabilidad del arco, soldadura de materiales ligeros y automatización de cordones largos) y ofrecían respuestas cada vez más eficientes.

En el ámbito del diseño estructural, la utilización de soldadura durante la Primera Guerra Mundial supuso el inicio de un cambio de paradigma. El remachado fue perdiendo protagonismo en favor de estructuras soldadas, más ligeras y con un comportamiento mecánico diferente. La industria naval adoptó progresivamente cascos totalmente soldados; la aviación evolucionó hacia fuselajes metálicos que dependían de uniones soldadas de alta calidad; y la construcción de puentes y estructuras metálicas se benefició de la posibilidad de reducir el número de piezas y uniones mecánicas.

En definitiva, la Primera Guerra Mundial marcó el tránsito de la soldadura por arco eléctrico desde una tecnología emergente a un elemento central de la producción industrial moderna. El conflicto no representó la etapa final de su desarrollo, pero sí el punto de inflexión que hizo evidente su importancia, aceleró su adopción y orientó las mejoras que serían esenciales en las décadas posteriores. Sin la presión y las necesidades derivadas de aquel periodo, la soldadura por arco no habría alcanzado con la misma rapidez el papel fundamental que desempeña en la industria actual.

5 CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo se ha analizado el proceso de aparición, consolidación y desarrollo de la soldadura por arco eléctrico en el contexto histórico comprendido entre finales del siglo XIX y la Primera Guerra Mundial. Este recorrido ha permitido comprender que la evolución de la soldadura no se produjo de manera aislada, sino que estuvo estrechamente vinculada a los cambios industriales, tecnológicos y bélicos que caracterizaron este periodo. La necesidad de unir estructuras metálicas de manera eficiente, resistente y económica surgió como consecuencia directa de la expansión del acero como material estructural, de la progresiva complejidad de los medios de transporte y del crecimiento de industrias como la naval, la ferroviaria y la incipiente aviación.

El análisis histórico muestra que la Segunda Revolución Industrial proporcionó las condiciones necesarias para el nacimiento de la soldadura por arco eléctrico. Los procedimientos tradicionales de unión —remachado y soldadura por forja—, adecuados para estructuras metálicas moderadas, comenzaron a resultar insuficientes cuando el tamaño, el peso y las exigencias mecánicas de barcos, locomotoras y puentes aumentaron de forma exponencial. La introducción de la electricidad en los procesos de fabricación y la posibilidad de generar un arco capaz de fundir metales se convirtieron en herramientas fundamentales para responder a esas nuevas necesidades.

La llegada de la Primera Guerra Mundial actuó como un catalizador que aceleró la adopción de la soldadura por arco eléctrico, a pesar de que el método no se encontraba todavía plenamente perfeccionado. El conflicto generó una demanda sin precedentes de reparación y fabricación de estructuras metálicas, obligando a la industria a recurrir a los procedimientos más rápidos y eficaces disponibles. En este contexto, la soldadura por arco eléctrico demostró ser un recurso de gran utilidad, permitiendo realizar intervenciones localizadas, reducir tiempos de fabricación, reforzar estructuras dañadas y afrontar necesidades de producción que los métodos tradicionales no podían satisfacer.

En cuanto a los procesos de soldadura por arco existentes en el periodo analizado, el estudio ha permitido establecer que, aunque el electrodo metálico revestido ya había sido patentado antes de 1914, su desarrollo industrial se encontraba aún en una fase temprana. La falta de estandarización, la complejidad en la fabricación de los revestimientos y la necesidad de una mayor formación específica impedían su implantación masiva. En contraste, la soldadura por arco con electrodo metálico desnudo sí había alcanzado un grado suficiente de madurez y disponibilidad para ser empleada a gran escala.

Su fabricación más sencilla, su menor coste, la robustez de los equipos asociados y su tolerancia a condiciones adversas explican que se convirtiera en el método predominante durante la guerra.

De esta forma, uno de los resultados más relevantes que se desprenden del trabajo es que la elección de la soldadura con electrodo metálico desnudo frente a la variante revestida no estuvo determinada por una superioridad tecnológica en términos de calidad final del cordón, sino por la madurez industrial y la viabilidad operativa en un escenario de guerra. La necesidad de mantener en funcionamiento flotas navales, redes ferroviarias, armamento y vehículos exigía métodos inmediatos y fiables, y el electrodo desnudo era, en aquel momento, la única opción capaz de responder eficazmente a estas exigencias.

Los sectores donde la soldadura por arco eléctrico tuvo un impacto más significativo fueron la industria naval, la aviación y el ferrocarril. En los astilleros, la posibilidad de reparar buques dañados con rapidez supuso una ventaja crucial, mientras que la construcción de las primeras embarcaciones completamente soldadas demostró el potencial de esta técnica para sustituir al remachado. En la aviación, la introducción de fuselajes metálicos y la utilización de soldadura en modelos pioneros marcaron el inicio de una transición que se consolidaría en las décadas posteriores. Y en el ferrocarril, la soldadura permitió mantener operativa una infraestructura sometida a un uso intensivo, contribuyendo a garantizar el transporte de tropas y suministros.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la Primera Guerra Mundial no representó la madurez definitiva de la soldadura por arco eléctrico, pero sí constituyó un punto de inflexión decisivo en su historia. La experiencia adquirida durante el conflicto evidenció tanto las fortalezas como las limitaciones de los procedimientos disponibles, orientando el desarrollo posterior hacia mejoras que serían fundamentales para el avance de la soldadura en el siglo XX. Las décadas posteriores fueron testigo de la estandarización de consumibles y equipos, del perfeccionamiento del electrodo revestido y de la aparición de nuevos procesos como la soldadura por arco sumergido, la soldadura TIG y los procedimientos MIG/MAG, todos ellos influenciados por las necesidades detectadas durante la guerra.

Por otro lado, la introducción de la soldadura en la construcción de estructuras metálicas permitió replantear los sistemas tradicionales de diseño. El empleo de uniones soldadas redujo el peso global de las estructuras, eliminó numerosos elementos auxiliares y facilitó la producción en serie. Este cambio contribuyó a la modernización de los sectores naval, aeronáutico y ferroviario, y sentó las bases para la arquitectura y la ingeniería metálica del siglo XX, cada vez más dependientes de uniones continuas y de mayor eficiencia mecánica.

En conjunto, el recorrido realizado en este trabajo permite llegar a varias conclusiones principales. En primer lugar, la soldadura por arco eléctrico surgió como respuesta directa a las necesidades industriales generadas por el uso masivo del acero y la complejidad creciente de los medios de transporte. En segundo lugar, la Primera Guerra Mundial aceleró de manera determinante su adopción, convirtiéndola en una herramienta imprescindible para la reparación y la construcción de estructuras metálicas. En tercer lugar, la predominancia de la soldadura con electrodo metálico desnudo frente a la soldadura con electrodo revestido durante el conflicto se explica por factores de disponibilidad, simplicidad y madurez tecnológica, y no por criterios estrictamente metalúrgicos. Finalmente, la experiencia acumulada durante este periodo impulsó el desarrollo de procesos de soldadura más avanzados y contribuyó a transformar el diseño y la producción industrial del siglo XX.

En definitiva, puede afirmarse que el periodo comprendido entre finales del siglo XIX y la Primera Guerra Mundial fue decisivo para la consolidación de la soldadura por arco eléctrico como una de las tecnologías fundamentales de la industria moderna. El conflicto bélico, lejos de ser únicamente un escenario de aplicación, actuó como motor de innovación, permitiendo que la soldadura pasara de ser una técnica incipiente a convertirse en un elemento central de la ingeniería y la fabricación contemporánea. El impacto de esta evolución se mantiene aún hoy, reflejado en la amplia variedad de procesos de soldadura que forman parte de la industria actual y que encuentran su origen en los avances, necesidades y desafíos de aquel periodo histórico.

6 Bibliografía

1. Picazo Iranzo, Álvaro. *Medios de unión de estructuras metálicas*. 2007.
2. JEFFUS, LARRY. *Soldadura. Principios y aplicaciones, Volumen 3*. s.l. : Ediciones Paraninfo, S.A., 2009.
3. *Welding Techniques*. Albloushi, Ahmad Hussain y Albloushi, Abdulhadi Hussain. 11 (Serie III), Diciembre de 2019, Journal of Engineering Research and Application (IJERA), Vol. 9. <https://www.ijera.com/papers/vol9no12/Serie-2/F0912023338.pdf>.
4. Asta , Eduardo. *Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico*. Buenos Aires : Fundación Latinoamericana de Soldadura, 2006.
5. Groover, Mikell P. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. s.l. : Pearson Educación, 1997.
6. Sepulveda Bello, Amanda. *La soldadura de arco*. s.l. : Universidad Nacional de Colombia.
7. LANCASTER, John Frederick. *Metallurgy of welding*. s.l. : Elsevier, 1999.
8. Howard, B. Cary y Scott, C. Helzer. *Modern welding technology*. 1979.
9. Kou, Sindo. *Welding metallurgy*. s.l. : A John Wiley & Sons Inc, 2003.
10. Bohnart, Edward R. *Welding: Principles and Practices*. s.l. : McGraw Hill, 2017.
11. Uniones Soldadas, Simbología en uniones soldadas. Slideshare. [En línea] Marzo de 2014. <https://es.slideshare.net/slideshow/uniones-soldadas-32330852/32330852>.
12. Vera Alvarado, Jorge wilfredo y Caballero Garcia, Luis Fernando. *Diseño de un dispositivo de utilidad para la verificación dimensional en soldaduras de filete y ranura*. s.l. : en la Nueva Era, 2022.
13. WIKIMEDIA COMMONS. LSS Test Specimen Figure. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LSS_Test_Specimen_Figure.png.
14. Luana, Claro L., Fabian, Quesada A. y Samir, Zuwolinsky E. *Proceso y tipos de soldadura para materiales metálicos y termoplásticos*. 2015.

15. *Caracterización de uniones soldadas en carrocerías automotrices mediante análisis visual a capa galvánica*. Llor, Leonardo Josue Torres, y otros. 14, s.l. : Revista Científica Multidisciplinaria SAPIENTIAE, 2024, Vol. 7.
16. *Desarrollo de un soldador por puntos para el laboratorio de proceso de manufactura de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*. Florez-Solano, Eder Norberto, Espinel-Blanco, Edwin Edgardo y Barbosa-Jaimes, Jhon Erickson. 1, s.l. : Revista Ingenio, 2019, Vol. 16.
17. Perez, Maria Jose. Oroel. *¿Qué es la soldadura aluminotérmica?* [En línea] [Citado el: 2 de Diciembre de 2024.] <https://oroel.com/ayuda-y-consejos/que-es-la-soldadura-aluminotermica/>.
18. WIKIMEDIA COMMONS. Velp-thermitewelding-1. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] 26 de Febrero de 2007. [Citado el: 2 de Diciembre de 2024.] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Velp-thermitewelding-1.jpg>.
19. Elegir un soplete de soldadura fuerte: Oxiacetileno, Aire acetileno vs. Oxi Mapa. AMBRO CONSTROLS. [En línea] <https://ambrocontrols.com/elegir-un-soplete-de-soldadura-fuerte-oxiacetileno-aire-acetileno-vs-oxi-mapa/?lang=es>.
20. Oxy-Hydrogen Welding. *Welding of Welders*. [En línea] 16 de Agosto de 2023. <https://weldingofwelders.com/oxy-hydrogen-welding/>.
21. *Guía para la selección de gases para oxicorte*. Carburos Metálicos. 2022.
22. Luz, Gelson. *¿Qué es la soldadura por electroescoria (ESW)? Blog de Materiales*. . [En línea] [Citado el: 24 de Noviembre de 2024.] <https://www.materiales.gelsonluz.com/2022/07/que-es-la-soldadura-por-electroescoria.html>.
23. WIKIMEDIA COMMONS. Electroslag. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electroslag.png>.
24. *Instrumentación de Equipo de Soldadura por Resistencia*. ALONSO Dominguez Molina, Luis, et al.
25. WIKIMEDIA COMMONS. Soldadura por puntos. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Soldadura_por_puntos.jpg.
26. —. Esquema proceso soldadura por roldanas. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esquema_proceso_soldadura_por_roldanas.JPG.

27. Magalhaes, Roberto. Compraco. *¿Qué es la soldadura por proyección?* [En línea] 3 de Mayo de 2024. [Citado el: 1 de Diciembre de 2024.] <https://compraco.com.br/es/blogs/industria/o-que-e-soldagem-por-projecao>.
28. Ward, John. What is Flash Butt Welding and How Does it Work? *KINGS OF WELDING*. [En línea] 22 de Abril de 2022. <https://www.kingsofwelding.com/guides/what-is-flash-butt-welding/>.
29. KEYENCE. Soldadura por recalcado / Soldadura por presión / Conceptos básicos de la soldadura automatizada. [En línea] [Citado el: 26 de abril de 2025.] <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure/welding/pressure/upset.jsp>.
30. TIPLE Q. Soldadura por alta frecuencia: la unión más tecnológica. *Triple Q*, s.f. [En línea] 03 de julio de 2024. <https://www.tripleq.com/blog/tecnicas/soldadura-por-alta-frecuencia-la-union-mas-tecnologica>.
31. WIKIMEDIA COMMONS. SMAW weld Area. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SMAW_weld_area.svg.
32. JEFFUS, Larry. *Manual de soldadura GTAW (TIG)*. s.l. : Ediciones Paraninfo, S.A., 2008.
33. WIKIMEDIA COMMONS. GTAW. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] 12 de enero de 2066. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GTAW.svg>.
34. *Soldadura GMAW-MIG/MAG*. URIBE, Carolina Llano. s.l. : Metal actual, 2010.
35. WIKIMEDIA COMMONS. GMAW weld area. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] 1994. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GMAW_weld_area.svg.
36. WELDING OF WELDERS. What is Capacitor Discharge Welding? *Welding of Welders*. [En línea] 11 de julio de 2023. <https://weldingofwelders.com/what-is-capacitor-discharge-welding/>.
37. DAVIS, Joseph R., et al. *ASM materials engineering dictionary*. s.l. : ASM international, 1992.
38. *Soldadura por arco de plasma en el sector de la construcción y reparación de oleoductos y gasoductos del país*. TENORIO, Luis Jheovanny Reyna, ULLOA-DE SOUZA, Raul Clemente y CHERE-QUÍÑONEZ, Byron Fernando. 6, s.l. : Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies, 2022, Vol. 3. 251-263.

39. De Molera Sola, Pere. *Soldadura industrial: clases y aplicaciones* (Vol. 56). s.l. : MARCOMBO, S.A., 1992.
40. Arranz, Alberto Cuesta. *Tecnología Láser. Aplicaciones Industriales*. s.l. : Marcombo, 2010.
41. WIKIMEDIA COMMONS. Laserové navařování 4. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea]
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laserov%C3%A9_nava%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_4.jpg.
42. Andy. What Is Hot Pressure Welding & How does It Work? *Welding Property*. [En línea] 8 de febrero de 2025. <https://weldingproperty.com/what-is-hot-pressure-welding/>.
43. Shane. Soldadura por presión en frío: Tipos, ventajas e inconvenientes, equipos. *MachineMFG*. [En línea] 10 de agosto de 2024. <https://www.machinemfg.com/es/cold-pressure-welding/>.
44. *Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding*. KUMAR RAJAK, Dipen, et al. 24, s.l. : Journal of Adhesion Science and Technology, 2020, Vol. 34. 2613-2637.
45. *Comportamiento microestructural de uniones de materiales disímiles obtenidas por explosión*. Castillo Matos, Juan Ramon, y otros. 2, s.l. : Minería y Geología, 2017, Vol. 33.
46. INGEMECAÍNICA. Fundamentos de la Soldadura Fuerte y Blanda. *Ingemecánica*, s.f. [En línea]
<https://www.ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn49.html>.
47. FOCO Induction. Tipos de soldadura fuerte: Explicación. *FOCO induction*, s.f. [En línea] <https://www.focoinduction.com/es/tipos-de-soldadura-fuerte-explicacion/>.
48. WIKIMEDIA COMMONS. Soldadura por inducción. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea]
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Soldadura_por_inducci%C3%B3n.png.
49. FRACTORY. Soldering Explained. *Fractory*, s.f. [En línea] [Citado el: 26 de abril de 2025.] <https://fractory.com/soldering-explained/>.
50. Arciniegas, Jaime y Ardila, Rosemberg. *Proceso de soldadura*. s.l. : Ediciones de la U, 2024.
51. R. D. , Simonson. *History of Welding*. 1969.
-

52. Historia de la soldadura: desde los orígenes antiguos hasta los usos modernos. ARCCAPTAIN. [En línea] 11 de diciembre de 2023. [Citado el: 16 de diciembre de 2024.] <https://www.arccaptain.com/es/blogs/article/history-of-welding?srsId=AfmBOorwVMgoX2fsyDjmoAgVntJ9wEOKCswqmDCSrxks2Pyg1HOMmhNW>.
53. *Desarrollo de técnicas de Inteligencia Artificial (IA) para su implementación en los procesos de fabricación aditiva*. FERNANDEZ-ZABALZA, Aitor, et al. 2024.
54. Otero, Aristides Silva y De Grossi, Mariela Mata. *La llamada revolución industrial*. s.l. : Universidad Catolica Andres, 1998.
55. De Medici, Abel. El risorgimento: La tortuosa unificación de Italia. *Historia National Geographic*. [En línea] 29 de julio de 2020. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/risorgimento-tortuosa-unificacion-italia_15171.
56. Garcia Mendez, Esperanza. *Italia desde la unificación hasta 1914*. s.l. : Ediciones AKAL, 1985.
57. WIKIMEDIA COMMONS. C. 1870 Unification of Italy. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] 1911. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:C._1870_Unification_of_Italy.jpg.
58. De Medici, Abel. La unificación Alemana y el nacimiento del Segundo Reich. *Historia National Geographic*. [En línea] 07 de Abril de 2021. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/unificacion-alemana-y-nacimiento-segundo-reich_16182.
59. WIKIMEDIA COMMONS. German unified 1815 1871. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:German_unified_1815_1871.svg.
60. GRENVILLE, John ashley Soames. *La europa remodelada. 1848-1878*. s.l. : Siglo XXI, 2018.
61. Togores, Luis E. *Japón en el siglo XX: de Imperio Militar a potencia económica*. s.l. : La Muralla, S.L., 2000.
62. De Medici, Abel. LA ERA MEIJI, EL NACIMIENTO DEL JAPÓN MODERNO. *Historia National Geographic*. [En línea] 2 de septiembre de 2023. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/era-meiji-nacimiento-japon-moderno_15772.
63. Hernandez, Jesus. *Norte contra Sur: Historia total de la Guerra de Secesión*. s.l. : Roca Editorial, 2012.

64. Marin, Jose Luis. El mapa de la guerra de Secesión en Estados Unidos. *El Orden Mundial*. [En línea] 23 de abril de 2024. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/mapa-guerra-secesion-estados-unidos/>.
65. Leiva, Alba. ¿Qué fue de la guerra de Secesión estadounidense? *El Orden Mundial*. [En línea] 9 de abril de 2024. <https://elordenmundial.com/que-fue-guerra-secesion-estadounidense/>.
66. Burns, Adam. Civil War Railroads: Map and Facts (North vs South). *AMERICAN-RAILS.COM*. [En línea] 27 de octubre de 2024. <https://www.american-rails.com/civil.html>.
67. ZINN, Howard. *La otra historia de los Estados Unidos*. s.l. : Seven Stories Press, 2011.
68. OpenStax. *World History Volume 2: The Second Industrial Revolution*. Houston : Rice University, 2022.
69. *Historia económica*. Bilbao, Luis y Lanza, Ramon. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid : Teoría Prácticas, 2010.
70. Gayubas, Augusto. Segunda Revolución Industrial. *ENCICLOPEDIA HUMANIDADES*. [En línea] 25 de abril de 2017. [Citado el: 17 de febrero de 2025.] <https://humanidades.com/segunda-revolucion-industrial/>.
71. Tesla, Edison y la guerra de las corrientes. *Endesa Fundación*. [En línea] 9 de enero de 2014. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/blog/tesla-edison-guerra-corrientes>.
72. El Convertidor de Bessemer: funcionamiento y aplicaciones. *Structuralia*. [En línea] 04 de noviembre de 2024. <https://blog.structuralia.com/convertidor-de-bessemer>.
73. WIKIMEDIA COMMONS. Bessemer converter. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bessemer_converter.jpg.
74. Historia de la Aviación: Un Viaje Fascinante a Través de los Cielos. *EAS BARCELONA. EUROPEAN AVIATION SCHOOL*. [En línea] 7 de AGOSTO de 2024. <https://easbcn.com/historia-de-la-aviacion-un-viaje-fascinante-a-traves-de-los-cielos/>.
75. Estes, Adam. Today in Aviation History: First Flight of the Junkers J.I. *VINTAGE AVIATION NEWS*. [En línea] 28 de Enero de 2025. <https://vintageaviationnews.com/warbird-articles/today-in-aviation-history/today-in-aviation-history-first-flight-of-the-junkers-j-i.html>.
-

76. WIKIMEDIA COMMONS. JunkerJ1Back 1915-12-12. *wikimedia commons*. [En línea] 12 de diciembre de 1915. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JunkerJ1Back_1915-12-12.jpg.
77. SYTECH PRECISION MANUFACTURING. The Evolution of Welding Over the Centuries. SYTECH. [En línea] [Citado el: 14 de junio de 2025.] <https://www.sytechprecision.com/2024/08/the-evolution-of-welding-over-the-centuries/>.
78. Wall, A. T. *Electric welding applied to steel construction, with special reference to ships. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1922.
79. Diaz Villanueva, Fernando. La refolución del telégrafo. [En línea] 29 de Septiembre de 2023. <https://diazvillanueva.com/la-revolucion-del-telegrafo/>.
80. Graham Bell, Alexander. *Máquina de telegrafía mejorada*. 174.465 Estados Unidos de América, 7 de Marzo de 1876.
81. de la Lama Garcia, Alfredo. *Economía mundial. De la revolución industrial al final de la primera guerra mundial*. México: Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa, 2010.
82. Sadurni, J.M. La Primera Gerra Mundial al Completo. *Historia National Geographic*. [En línea] 26 de julio de 2024. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/origenes-causas-y-efectos-primer-guerra-mundial-2_18350.
83. Clark, Christopher. *Sonámbulos: cómo Europa fue a la guerra en 1914*. s.l. : Galaxia Gutenberg, 2014.
84. WIKIMEDIA COMMONS. Alliance system. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alliance_system_.png.
85. —. Mapa de Europa en 1914. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mapa_de_Europa_en_1914.png.
86. Stevenson, David. *1914-1918. Historia de la Primera Guerra Mundial*. 2016.
87. Sadurni, J.M. LA GUERRA DE TRINCHERAS DURANTE LA PRIMERA GUERRA MUNDIAL. *Historia National Geographic*. [En línea] 13 de marzo de 2023. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/guerra-trincheras-durante-primer-guerra-mundial_18390.
88. Cervera, Francesc. La batalla de Galípoli: La peor derrota aliada de la primera guerra mundial. *Historia National Geographic*. [En línea] 10 de

noviembre de 2023. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/batalla-galipoli-peor-derrota-aliada-primera-guerra-mundial_20472.

89. WIKIMEDIA COMMONS. HMS Queen Elizabeth (1913) RMG N16732. WIKIMEDIA COMMONS. [En línea] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HMS_Queen_Elizabeth_\(1913\)_RMG_N16732.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HMS_Queen_Elizabeth_(1913)_RMG_N16732.jpg).

90. Quero Rodiles, Felipe. *Historia militar de la Primera Guerra Mundial "De la caballería al carro de combate"*. 2009.

91. Sadurni, J.M. La batalla de Verdún, la peor batalla de la primera guerra mundial. *Historia National Geographic*. [En línea] 1 de septiembre de 2022. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/batalla-verdun-peor-batalla-primera-guerra-mundial_15982.

92. OUSBY, Ian. *Road To Verdun*. s.l. : Random House, 2010.

93. PRIOR, Robin y WILSON, Trevor. *The Somme*. s.l. : Yale University Press, 2016.

94. GUTTMAN, Jon. *Reconnaissance and Bomber Aces of World War 1*. s.l. : Boomsbury Publishing, 2015.

95. Keegan, John. *The First World War*. 2000.

96. Strachan, Hew. *The First World War*. 2006.

97. Rodriguez, Jesus Sanchez. 1914. *El quiebre de la historia. Causas y consecuencias de la primera guerra mundial*.

98. Soldadura eléctrica: sus orígenes, la evolución y la aportación de Ucrania. METINVEST. [En línea] 7 de julio de 2021. [Citado el: 17 de enero de 2025.] <https://metinvestholding.com/es/media/news/elektrosvarka-istoriya-poyavleniya-evolyuciya-i-sled-ukraini>.

99. Casas, Nina y Arredondo Vera, Pablo. La Revolución Industrial y el acero: avances tecnológicos. GERDAU CORSA. [En línea] 28 de abril de 2021. [Citado el: 18 de enero de 2025.] <https://www.gerdaucorsa.com.mx/la-revolucion-industrial-y-el-acero-avances-tecnologicos>.

100. Bonet, Joan. Historia de la soldadura. *Joan Bonet Engineering*. [En línea] [Citado el: 18 de enero de 2025.] <https://joanbonetm.wordpress.com/2019/06/18/historia-de-la-soldadura/#:~:text=En%201881%2C%20el%20franc%C3%A9s%20Auguste,d e%20las%20bater%C3%ADas%20de%20almacenamiento..>

101. De Benardos, N. y Olszewski, S. *Process of and Apparatos For Working Metals By the Direc Application of The Electric Ourrent*. 363,320 17 de Mayo de 1887.
102. Coffin, C. L. *Process of Welding Metals Electrically*. 428,459 Estados Unidos de América, 20 de Mayo de 1890.
103. La Historia de la Soldadura. SOMISA. [En línea] 12 de junio de 2017. [Citado el: 18 de enero de 2025.] <https://somisa.mx/la-historia-de-la-soldadura/>.
104. Meredith, Russell. *Welding Torch*. 2,274,631 Estados Unidos de América, 24 de Febrero de 1942.
105. Hernandez Nuño, Maria Jose. SCRIBD. *Cuadernillo Aplicación de Procesos de Soldadura*. [En línea] 2 de Marzo de 2022. [Citado el: 2 de Febrero de 2025.] <https://es.scribd.com/document/562219931/Cuadernillo-aplicacion-de-procesos-de-soldadura>.
106. Springer. *Unionarc Process Features Magnetically Coated Rod*. [En línea] <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF03397958.pdf>.
107. Gage, Robert M. *Soplete de arco y proceso*. 2,806,124 Estados Unidos de América, 10 de Septiembre de 1957.
108. ¿Qué es la soldadura por plasma? ARCCAPTAIN. [En línea] 25 de enero de 2024. <https://www.arccaptain.com/es/blogs/article/what-is-plasma-welding-paw?srsItd=AfmBOorOlGvUP-rOOqQgE-F7r587gvzJfnD940Dzbx8Hk3eJkQOSqYA>.
109. Historia de la soldadura: de los inicios a las últimas tecnologías. SEABERY. [En línea] [Citado el: 15 de Febrero de 2025.] <https://seaberyat.com/es/historia-de-la-soldadura-de-los-inicios-a-las-ultimas-tecnologias/>.
110. Weld Australia. A History of Welding. *Weld Australia*. [En línea] [Citado el: 17 de junio de 2025.] <https://weldaustralia.com.au/discover-the-world-of-welding/a-history-of-welding/>.
111. SOUTHERN BOYZ WELDING. The Evolution of Welding Technology. *Southern Boyz Welding*. [En línea] 13 de septiembre de 2024. <https://southernboyzwelding.com/evolution-of-welding-technology/>.
112. CUFF, Thomas Mark. 'VACUUM ARC, SPARK or DISCHARGE' PHENOMENA, a.k.a. METAL VAPOR ARC or just plain ARC PHENOMENA. 1993.

113. LINCOLN ELECTRIC. *The Procedure Hnadbook of Arc Welding*. s.l. : McGraw-Hill Education.

114. Lyreco Intersafe. ¿Qué es un arco eléctrico? Usos, tipos y riesgos al soldar. *Lyreco Intersafe*. [En línea] [Citado el: 6 de julio de 2025.] <https://intersafe.es/index.php/2023/08/21/que-es-un-arco-electrico-2/>.

115. WIKIMEDIA COMMONS. Arco eléctrico. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] 20 de julio de 2011. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arco_el%C3%A9ctrico.jpg.

116. LINCOLN ELECTRIC. Arc Welding Fundamentals. *Lincoln Electric*. [En línea] [Citado el: 2025 de julio de 6.] <https://www.lincolnelectric.com/en/Welding-and-Cutting-Resource-Center/Process-and-Theory/Arc-Welding-Fundamentals>.

117. de Naoum, Kat y Conniff, Megan. All About Arc Welding. *Xometry*. [En línea] 24 de junio de 2023. <https://www.xometry.com/resources/sheet/what-is-arc-welding/>.

118. Perez, Maria Jose. Métodos de soldadura por arco eléctrico. *OROEL*. [En línea] [Citado el: 7 de julio de 2025.] <https://oroel.com/ayuda-y-consejos/metodos-de-soldadura-por-arco-electrico/>.

119. AVELAR AMAYA, Jose David, FIGUEROA HERNANDEZ, Wilfredo y GUZMAN RODRIGUEZ, Leonel Alejandro. *Guía de prácticas de laboratorio para los procesos de soldadura por arco eléctrico convencional, soldadura a gas (oxiacetilénica), y soldaduras especiales (TIG/MIG)*. 1995.

120. MESSLER JR, Robert W. *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*. s.l. : John Wiley & Sons, 2024.

121. Tariqul. Correct Amperage for Arc Welding: Tips for Choosing Electrode Amperage and Success. *Weldinghubs*. [En línea] 4 de abril de 2025. <https://weldinghubs.com/correct-amperage-for-arc-welding/>.

122. Miller, Mark R. y Miller, Rex. *Welding Licensing Exam Study Guide*. s.l. : McGraw Hill, 2022.

123. TWI. When manual metal arc welding, which electrode polarity should I use? *TWI*. [En línea] [Citado el: 25 de julio de 2025.] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-when-manual-metal-arc-welding-which-electrode-polarity-should-i-use?>.

124. Del Pino, Jose M^a Tamborero. *NTP 494: Soldadura eléctrica al arco: normas de seguridad*. s.l. : Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1998.

125. Electrodes Used in Welding Process | Equipment | Welding | Metallurgy. *Engineering Notes*. [En línea] [Citado el: 13 de julio de 2025.] <https://www.engineeringenotes.com/metallurgy/welding/electrodes-used-in-welding-process-equipment-welding-metallurgy/21697?>.

126. Lincoln Electric. Seguridad de puesta a tierra y soldadura por arco. *Lincoln Electric*. [En línea] [Citado el: 13 de julio de 2025.] <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/welding-and-cutting-resource-center/process-and-theory/grounding-and-arc-welding-safety>.

127. MECAWELD. Why Prepping Your Base Metal Is Crucial for Strong Welds. *MECAWELD*. [En línea] 1 de julio de 2025. <https://mecaweldusa.com/blog/why-prepping-your-base-metal-is-crucial-for-strong-welds/>.

128. WIKIMEDIA COMMONS. SMAW set up. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SMAW_setup.PNG.

129. KEZVERCHILE. Manual soldadura por arco manual. *KEZVERCHILE*. [En línea] [Citado el: 23 de julio de 2025.] <https://www.kezverchile.cl/wp-content/uploads/2014/06/manual-soldadura-arco-manual.pdf>.

130. Favaloro, Rene y Perez, Roque. Soldadura por arco eléctrico - Material de apoyo - EEST 1. *Escuela Técnica 1*. [En línea] junio de 2022. <https://escuelatecnica1roqueperez.edu.ar/wp-content/uploads/2022/06/Soldadura-por-arco-electrico-material-de-apoyo-EEST1-RP.pdf>.

131. Weldtech. Welding Arc stability. *Weldtech*. [En línea] 26 de julio de 2020. <https://weld.theweldings.com/2020/07/welding-arc-stability.html>.

132. XIRIS AUTOMATION INC. Porosity in Welding: Causes, Types and How to Detect It. *XIRIS*. [En línea] 5 de marzo de 2025. <https://blog.xiris.com/blog/porosity-in-welding-causes-types-and-how-to-detect-it?>.

133. WELDING HISTORY. Welting timeline 1900-1950. *Welding History*. [En línea] [Citado el: 7 de septiembre de 2025.] <https://www.weldinghistory.org/whfolder/folder/wh1900.html>.

134. *Early Welding for the Royal Navy*. BROWN, D. K., MENG, CENG y FRINA, RCNC. s.l. : Journal of Naval Engineering, 1992, Vol. 34.

135. WIKIMEDIA COMMONS. HMS Glatton in drydock. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] [Citado el: 11 de Septiembre de 2025.] Imagen de dominio público.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HMS_Glatton_in_drydock_IWM_SP_2083.jpg.

136. MYERS, Frank K. *The Socotra Sparrow: A Novel Dissertation*. s.l. : Xlibris Corporation, 2010.

137. Great Lakes Tugs & Workboats. Dorothea M. Geary. *Great Lakes Tugs & Workboats*. [En línea] [Citado el: 7 de septiembre de 2025.] <https://gltugs.wordpress.com/dorothea-m-geary/>.

138. Daniels, Josephus. *Our Navy at War*. Washington D.C. : s.n., 1922.

139. WIKIMEDIA COMMONS. The Motor Ship Fullagar. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] The Engineer, 16 de julio de 1920. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Motor_Ship_Fullagar_\(The_Engineer,_16_July_1920,_page_69,_cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Motor_Ship_Fullagar_(The_Engineer,_16_July_1920,_page_69,_cropped).jpg).

140. Fokker, Anthony. *Flying Dutchman*. 1931.

141. WIKIMEDIA COMMONS. Fokker Eindecker I. *WIKIMEDIA COMMONS*. [En línea] [Citado el: 20 de Noviembre de 2025.] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fokker_Eindecker_I.jpg.

142. Ensamble Por Soldadura. *Procesos de Manufactura UNIDAD 4*. [En línea] <https://procesosmanufacturau4.weebly.com/ensamble-por-soldadura.html>.

143. Rodriguez, Pedro. *Manual de soldadura*. s.l. : TECNIBOOK EDICIONES, 2013.

144. Metalmecánica, Equipo editorial de. Soldadura láser: innovación y aplicaciones en la industria moderna. *Metalmecánica*. [En línea] 12 de Marzo de 2024. [Citado el: 24 de Noviembre de 2024.] <https://www.metalmecanica.com/es/noticias/soldadura-laser-innovacion-y-aplicaciones-en-la-industria-moderna>.

145. *Proceso de soldadura GMAW para aceros ordinarios al carbón, aceros inoxidables y aluminio*. GRANJA, Mario y Hidalgo, Victor. 2, s.l. : Revista Politécnica-Julio, 2013, Vol. 32. 11-18.

146. Xia, Sean. ¿Qué es la soldadura por difusión? *BaiChuan*. [En línea] 21 de junio de 2024. [Citado el: 14 de diciembre de 2024.] <https://bccncmilling.com/es/what-is-diffusion-welding/>.

147. *Soldadura ultrasónica*. Elizondo Garza, Fernando Javier, Lara Ochoa, Carlos Amador y Cupich Guerrero, Jorge Alejandro. 16, s.l. : Ingenierías, 2002, Vol. 5. 31-37.

148. Duggan, Christopher. *Historia de Italia*. s.l. : Akal, 2017.
149. The unification of Germany 1815-71. *Gifex*. [En línea] <https://gifex.com/detail3-en/2011-05-23-13721/The-unification-of-Germany-1815-71.html>.
150. Rojas, Juan Carlos. El fabricante de calentadores que cambió la historia de la aviación. *EL TIEMPO*. [En línea] 28 de Septiembre de 2019. <https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/historia-de-hugo-junkers-el-hombre-que-creo-el-primer-avion-de-metal-417550>.
151. Dwivedi, Dheerendra Kumar. *Fundamentals of Metal Joining*. Sigapur : Springer, 2021.
152. EastCarbon. Soldadura con arco de carbono 101: una guía completa para principiantes y expertos. *EastCarbon*. [En línea] 17 de octubre de 2024. <https://www.eastcarb.com/es/soldadura-por-arco-de-carbono/>.
153. Rosero, Anderson. Esquema de Soldadura por Arco Eléctrico. [En línea] 16 de julio de 2020. <https://es.scribd.com/document/469408817/ESQUEMA-DE-SOLDADURA-POR-ARCO-ELECTRICO>.
154. LINCOLN ELECTRIC. Guidelines for Welding Cast Iron. *Lincoln Electric*. [En línea] [Citado el: 14 de julio de 2025.] <https://www.lincolnelectric.com/en/Welding-and-Cutting-Resource-Center/Welding-How-Tos/Guidelines-for-Welding-Cast-Iron?>.
155. ARCCAPTAIN. How To Weld Copper Using TIG, MIG, and Stick Welding. *Arccaptain*. [En línea] 24 de diciembre de 2023. <https://www.arccaptain.com/blogs/article/how-to-weld-copper>.
156. TWI. Weldability of materials - nickel and nickel alloys. *TWI*. [En línea] [Citado el: 14 de julio de 2025.] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/weldability-of-materials-nickel-and-nickel-alloys-022>.
157. Torres, Edna Margarita Moncayo. *LA INGENIERÍA Y SUS APLICACIONES. Una perspectiva desde la industria, la investigación y la educación*. 2020.