

PROCESOS METALÚRGICOS EN LA SOLDADURA

Héctor Cochise Terán Herrera
Víctor Hugo Andaluz Ortiz
Oscar Bladimir Arteaga López
William M. Bonilla Jiménez



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Procesos metalúrgicos en la soldadura

MSc. Héctor Cochise Terán Herrera; Dr.C. Víctor Hugo Andaluz Ortiz; M.Sc. Oscar Bladimir Arteaga López y M.Sc. William M. Bonilla Jiménez

Primera edición electrónica. Octubre de 2018

ISBN: 978-9942-765-28-4

Revisión científica: Julio Cesar Pino Tarrago y Idalberto Macías Socarrás

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

CrnI. Ing. Ramiro Pazmiño O.

Rector

Publicación autorizada por:

Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Cpvn. Hugo Pérez

Presidente

Edición y producción

David Andrade Aguirre

daa06@yahoo.es

Diseño

Pablo Zavala A.

Derechos reservados. Se prohíbe la reproducción de esta obra por cualquier medio impreso, reprográfico o electrónico.

El contenido, uso de fotografías, gráficos, cuadros, tablas y referencias es de **exclusiva responsabilidad del autor.**

Los derechos de esta edición electrónica son de la **Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE**, para consulta de profesores y estudiantes de la universidad e investigadores en: <http://www.repositorio.espe.edu.ec>.

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Av. General Rumiñahui s/n, Sangolquí, Ecuador.

<http://www.espe.edu.ec>



PROCESOS METALÚRGICOS EN LA SOLDADURA

Héctor Cochise Terán Herrera
Víctor Hugo Andaluz Ortiz
Oscar Bladimir Arteaga López
William M. Bonilla Jiménez

Prólogo

En el desarrollo industrial actual de las tecnologías en el campo de la construcción de maquinarias, cada día se estrechan más las líneas de las diferentes disciplinas que componen la misma, tales como las de maquinado, fundición, metalografía, tratamientos térmicos, soldadura, etcétera. El libro en cuestión se perfila en este sentido para el caso de los procesos de soldadura con el objetivo de unir diferentes materiales, estudiando la relación entre las estructuras, las propiedades y la composición química de las uniones realizadas; el mismo constituye el texto para los estudiantes que cursan la carrera de ingeniería mecánica y también pueden ser utilizado por investigadores, profesionales que trabajan en diferentes fábricas y servir de consulta a técnicos medios especializados en este campo.

El enfoque de la obra va dirigido a elevar el nivel de los técnicos medios, superiores, etc., y a preparar a los egresados de los centros de educación superior en problemas concretos sobre la temática de la cual ella trata.

En la obra se vinculan los conocimientos básicos adquiridos por los estudiantes en los cursos de metalografía y resistencia de materiales con los de la disciplina de soldadura y tienen como objetivos esenciales los siguientes:

- a) Seleccionar materiales y métodos para la fabricación o recuperación de piezas por soldadura.
- b) Describir los procesos para la fabricación o recuperación de piezas por soldadura.
- c) Seleccionar los métodos medios e instalaciones para realizar el control de la calidad.
- d) Describir los diferentes tipos de tensiones y deformaciones en las uniones soldadas.
- e) Diseñar los aspectos básicos del proceso tecnológico para la soldadura o la recuperación de piezas por soldadura.

Se estudian algunos de los procesos de soldadura existentes, con vista a que el estudiante conozca estos y pueda comprender el desarrollo de los capítulos posteriores, más tarde se dan los conceptos básicos de soldadura que se estudian en el texto. Se hace un estudio detallado de las dos zonas estructurales de la unión soldada, que son la zona fundida y la de influencia

térmica (ZIT), así como la tendencia al agrietamiento de cada una de ellas y las principales medidas para evitarlas, entre las cuales se encuentra el precalentamiento, tratamiento térmico posterior, etcétera.

En el libro se analiza la soldabilidad de los materiales más utilizados en la práctica, tales como: aceros de bajo, medio y alto contenido de carbono, algunos aceros bajo aleados, aceros inoxidable aleados al cromo-níquel austeníticos, aceros aleados al cromo martensíticos y ferríticos, hierros fundidos y algunos metales y aleaciones no ferrosos. Al final de la obra se realiza un estudio detallado de las tensiones y deformaciones en las uniones soldadas, así como los defectos y los métodos de detectarlos con una profundidad acorde a la importancia que tiene la materia para el dominio de especialistas en esta rama.

En el texto actual se plantean aspectos muy interesantes tanto desde el punto de vista científico técnico, así como metodológico, estos son:

- a) Se expone con rigor científico el desarrollo histórico de la ciencia de la soldadura en el mundo.
- b) Se brindan las “Recomendaciones tecnológicas para la soldadura de los diferentes materiales para los procesos de soldadura manual por arco y llama” lo cual se considera que tiene un elevado nivel técnico y metodológico, pues con estas se permite elaborar el diseño de tecnologías para la resolución de diferentes tipos de problemas en la práctica industrial.”
- c) Se tratan con rigor científico los temas siguientes: agrietamiento de las uniones soldadas, soldabilidad de los aceros aleados, soldadura y recuperación de piezas de hierros fundidos, tensiones y deformaciones y defectos y control de las uniones soldadas. En estos capítulos los autores tienen trabajos de investigación, conferencias, etc. que han podido enriquecer el material en cuestión.
- d) Se brindan dos softwares para la selección automatizada de materiales de aporte y tecnologías para los aceros inoxidable y termo resistentes, así como para los hierros fundidos, los cuales son de gran utilidad industrial y en estos se utilizan las normas y firmas de los fabricantes más empleados en el mundo.

En esta edición se plantea toda una serie de ejemplos prácticos en los cuales se utilizan las recomendaciones tecnológicas anteriormente citadas.

En el texto se introducen más de 100 términos en idioma inglés y se encuentra escrito en dos tipos de letras, la más grande de estudio obligatorio y las pequeñas en negritas para lograr un mayor grado de profundización.

La obra cumple con los objetivos para lo cual ha sido elaborada y se les agradece a los interesados en la lectura de la misma sus criterios para su perfección.

Los Autores.



CAPÍTULO 1

Nociones Fundamentales

INTRODUCCIÓN

Terminología

En la fabricación o reparación de piezas, equipos maquinarias, etc., inciden diferentes procesos tecnológicos de la industria mecánica, los cuales tienen el objetivo de lograr un producto terminado con la calidad requerida. Estos procesos son: maquinado, fundición, conformación de metales, soldadura, etc., teniendo cada uno de ellos su nivel de importancia de acuerdo al tipo de pieza a fabricar o reparar, cantidad de estas, etc. Dentro de estos procesos tecnológicos nuestro estudio se enfoca hacia los de soldadura, mediante los cuales se logran la unión de partes o piezas de forma que no se puedan desarmar y de una manera rápida y económica.

La historia de la unión de piezas por soldadura es muy antigua pues hace aproximadamente 2500 años un herrero griego llamado Glaukos unía piezas, calentando estas en un horno hasta que se ablandaban y luego le aplicaba golpes con un martillo hasta que se unían. No obstante, la unión de piezas se mantuvo durante muchos años condicionada a las tecnologías con remaches y tornillos las cuales son soluciones lentas y costosas que impedían el rápido desarrollo de la producción. (MIKY, 2012)

Por esta razón técnicos y científicos de esta época, dedicaron sus esfuerzos a buscar una tecnología de unión de metales que estuviera acorde con las exigencias del desarrollo industrial de esos momentos, y es cuando se descubre la unión de metales mediante la utilización de la fusión local, que más tarde se definió como procesos de soldadura y que adquieren un grado elevado de desarrollo cuando se descubren las fuentes de energía calórica, como son la llama oxiacetilénica y el arco eléctrico. En el año 1801 el químico inglés Sir Humphrey Davy descubrió que al hacer acercar los dos terminales de una pila saltaba una chispa dando la idea de que se podía utilizar para unir metales. En el año 1802, el académico V.V. Petroff observó que al hacer pasar una corriente eléctrica a través de dos electrodos de carbón se generaba una descarga eléctrica incandescente (arco eléctrico) la cual tenía una alta temperatura. Este descubrimiento de Petroff no fue aplicado a la unión de materiales hasta que el ingeniero Nikolay Benardos inventó el proceso de soldadura por arco eléctrico con el empleo de electrodos de carbón. En el año 1888, N. G. Slavianoff inventó la soldadura por arco con electrodo

metálico y logró reparar defectos exteriores de piezas fundidas; además creó el primer generador de soldadura y elaboró diferentes fundentes para mejorar la calidad del metal fundido durante el desarrollo de los procesos de soldadura. (IK4-Lortek, 2017)

En 1899 se patenta el proceso de soldadura con termita por el alemán Goldchmidt que hoy en día se utiliza para la soldadura de raíles. (Ponce, 2012)

En el año 1908 el sueco Kjellberg descubrió la soldadura por arco con electrodo metálico revestido (covered electrode) cuando se le ocurre cubrir el electrodo desnudo de Slavianoff con sustancias ionizantes para aumentar la calidad de las uniones soldadas. Después de la primera guerra mundial, en el año 1919, se funda la Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society) como una organización dedicada al desarrollo de la soldadura en los E.U.A.

En el año 1920 P. O. Nobel que trabajaba en la General Electric Company inventa la soldadura automática que se utilizó en la reconstrucción de motores y ruedas de grúas. En el año 1930 se patentó por Robinoff el proceso de soldadura automática bajo arco sumergido el cual tiene una alta productividad.

En el año 1934 R. Sarazin y M. Moneyron descubren el electrodo metálico con revestimiento básico y dan un nuevo aporte a la calidad de las uniones soldadas efectuadas con estos procesos.

El Battelle Memorial Institute inventa en el año 1948 los procesos de soldadura bajo gases protectores y en el 1953 Lyubavskii y Novoshilov desarrollaron el proceso de soldadura con electrodo consumible bajo protección de CO₂.

En el año 1957 se utilizó en la antigua URSS el proceso de soldadura por electro escoria de una elevada productividad.

El proceso de soldadura por haz de electrones se presenta por J. A. Stohr (Comisión de Energía Atómica de Francia) en el año 1957. En la década del 50 también se descubre la soldadura por explosión.

En el año 1960 se comienza a desarrollar la soldadura por rayos Láser, en el 1961 se rellenan piezas mediante el proceso de plasma y en 1963 se suelda con el mismo.

Entre los años 1962 a 1966 se desarrollaron cámaras al vacío con gases inertes que permitieron el desarrollo de la soldadura por haz de electrones.

En el año 1970 se emplea el ultrasonido para unir, hacer crecer y cortar los huesos y tejidos vivos. G. A. Nikolaiev (miembro de la Academia de Ciencias de la URSS) y un grupo de cirujanos auxiliándose de un equipo de ultrasonido desarrollaron esta tecnología.

Los materiales de aporte también se incrementaron de manera acelerada y en la década de 1980-90 en la antigua URSS se producen 1 millón de toneladas de electrodos de soldar para diferentes tipos de procesos de soldadura y en los EUA se producen el 55% de electrodos para soldadura manual, 20 % para procesos bajos gases protectores 15% de electrodos tubulares y el 7 % para alambres de soldadura bajo arco sumergido. (González & Molina, 1994)

La tendencia mundial muestra que hasta el año 1988 se encuentra con un gran desarrollo el empleo de equipos semiautomáticos bajo gas protector CO₂ en comparación con los de arco sumergido. En el mundo actual la industria se proyecta hacia la automatización de la producción con Robots, células flexibles de trabajo, desarrollo de sistemas de expertos, etc.

En la actualidad un lugar importante lo ocupan los Robots y el año 1979 Japón poseía el 69%, EUA 16%, Alemania Federal 850, Suecia 600, etc.

Hoy en día se pueden encontrar equipos de soldadura TIG, por resistencia eléctrica, programables, equipos con cabezales múltiples con los sistemas CNC (Computer Numerical Control), etc. (Vallini, 1970)

La soldadura a finales del siglo manifiesta su máxima tendencia a la automatización y todos los países están inmersos en esta actual tarea. (AGA, 1988)

La soldadura con llama se desarrolla paralelamente como proceso de unión de metales cuando Jottrand en el año 1894 realiza uniones metálicas por soldadura en aceros con llama oxhídrica, descubierta por Saint Claire Deville en 1850. En el año 1892 el francés H. Moissau industrializó la fabricación del carburo de calcio y facilitó la utilización de la llama oxiacetilénica estudiada por el científico H. Le Chatelier, la cual tiene ventajas únicas para los procesos de soldadura con llama. Dentro de todos los procesos utilizados para unir los metales, los de soldadura ocupan un lugar preponderante y único debido a toda una serie de ventajas, las cuales se mencionan a continuación: (ASM Handbook Committee, 1971)

1. Economía del metal.

Los procesos de soldadura ahorran una cantidad apreciable de metal en comparación a los procesos de unión de metales por remaches.

2. Posibilidad de fabricar piezas de gran tamaño con la unión de piezas o semiproductos de pequeñas dimensiones.

3. Posibilidad de reparación y corte de piezas.

Mediante estos procesos se reparan piezas desgastadas o rotas, lo cual provoca que se restauren ellas o el equipo al cual pertenecen con un bajo costo de reparación.

4. Aumento de la productividad y disminución del costo de producción.

En los procesos de soldadura la operación de unión de metales se realiza en un tiempo relativamente corto, lo cual provoca un aumento de la productividad, esto conjuntamente con la disminución de los gastos iniciales y de mantenimiento ocasionan una reducción del costo de producción.

5. Reducción de costo de equipos tecnológicos.

Esto se debe a que no se necesitan equipos auxiliares, tales como: taladradoras, remachadoras. etc.

6. Uniones soldadas herméticas

7. Eliminación de ruidos y mejoramiento de las condiciones de trabajo.

Mediante los procesos de soldadura se pueden obtener uniones soldadas con resistencias mecánicas iguales a la de las piezas a soldar; por esta razón estos procesos tienen aplicación en diferentes tipos de construcciones que requieren resistencia tales como: calderas de vapor de alta presión, tubos de hornos de petróleo, puentes, aviones, elementos de máquinas, etc. (AWS, 1966)

La unión no desarmable de dos o más piezas se obtiene cuando los átomos de cada una se encuentran tan cerca que en ellos comienzan a actuar las fuerzas de atracción. Esto se obtiene bajo tres condiciones que son: calentamiento del material hasta el punto de fusión en el sitio de la unión, calentamiento y presión simultánea y aplicación de presiones elevadas sin ser calentadas las

piezas. Analizando las macrografías de las uniones soldadas estas constan de dos partes, tal como se observa en la Figura 1, la zona fundida (fusion zone) y la zona de influencia térmica (ZIT) o zona afectada por el calor (HAZ, heat affected zone). La zona fundida está constituida por el material solidificado, el cual ha sufrido durante la fusión un cierto número de transformaciones del orden físico - químico o estructural, mientras que la zona de influencia térmica está sometida a un tratamiento térmico variable de acuerdo con el punto considerado, ya que la temperatura disminuye desde el centro de la zona fundida hacia la de influencia térmica; en esta ocurren transformaciones físico-químicas, las cuales dependen del ciclo térmico impuesto y de la naturaleza del material a soldar. (Allegheny Ludlum Steel Corporation, 1976)

A) Terminología

A continuación, se dan toda una serie de conceptos básicos necesarios para la comprensión de los conocimientos que se estudian posteriormente. En la mayoría de los términos se ha tenido en cuenta la Norma Cubana de Términos y definiciones. (Aluminum Company of America, 1954)

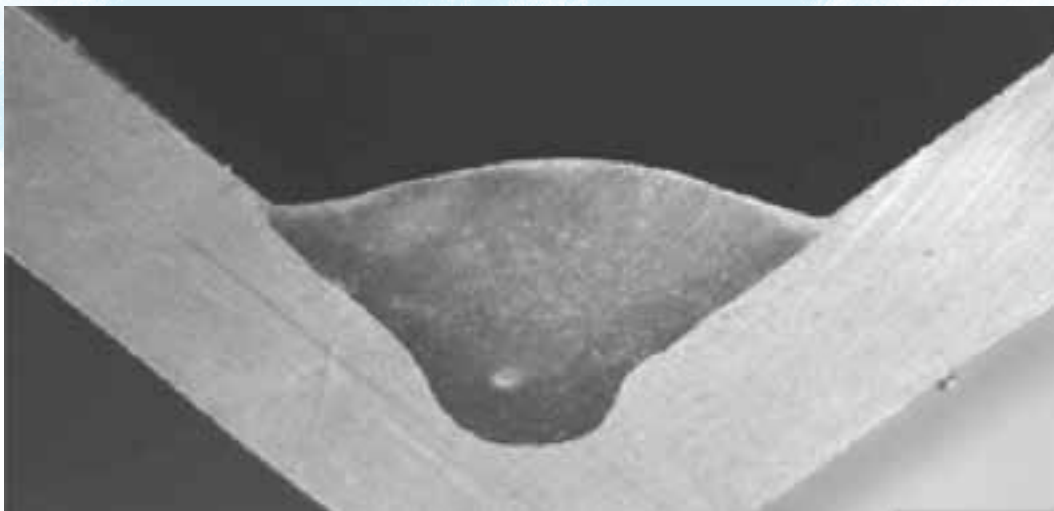


Figura 1 Macro estructura de una unión soldada
Ilustración: (IK4-Lortek, 2017)

Soldadura (Welding)

Procedimiento mediante el cual se pueden unir dos o más partes, de forma indesarmable con ayuda de fuentes de calor y/o presión localizadas y en el cual se puede utilizar o no material de aportación. (Amo, 1985)

Las uniones soldadas se pueden lograr mediante la fusión, con calor y presión y solo con presión, además el material de aportación puede tener la misma o diferente composición química que el material base. (AGA, 1988)

Soldar (Welding action)

Acción en la cual, mediante un procedimiento, se obtiene la unión de las partes.

Soldabilidad (Welding)

Capacidad de los materiales para ser soldados manteniendo sus propiedades físico-químicas y estructurales.

Unión soldada (Weld joint)

Unión permanente de dos o más partes, obtenidas mediante la soldadura en una zona determinada.

Junta (joint)

Forma geométrica de la unión.

Junta a tope (butt joint)

Forma de unión en que los bordes de la pieza a soldar están colocados uno frente al otro en un mismo plano (Figura 2).

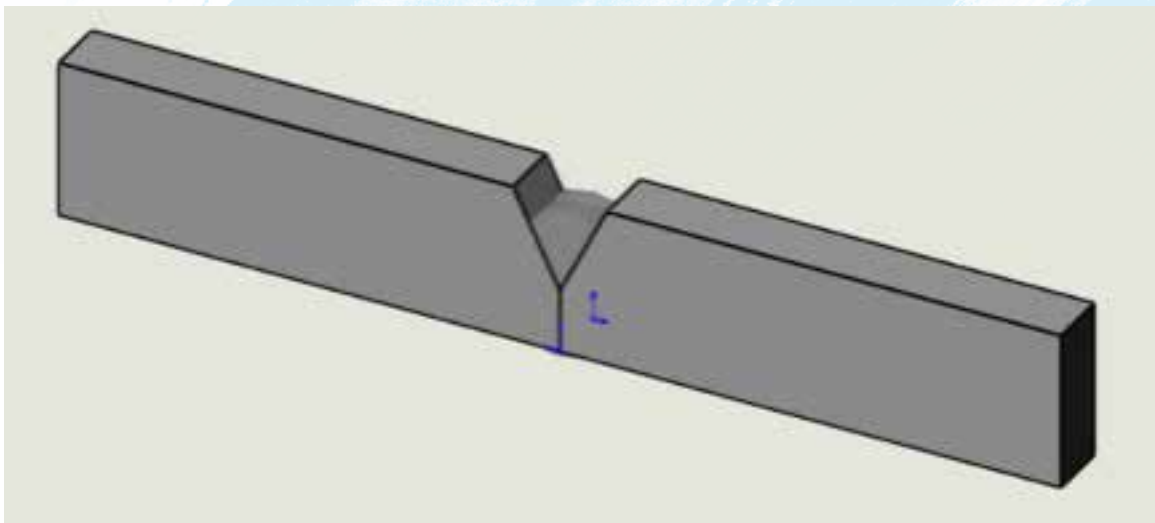


Figura 2 Junta a tope
Ilustración: Héctor Terán

Junta en T (T joint)

Forma de unión en que el borde de una de las piezas se coloca en la superficie de la otra perpendicularmente. (Figura 3). Las costuras obtenidas en este tipo de unión se le suele denominar por el término de soldadura de filete (Fillet weld).



Figura 3 Junta en T
Ilustración: Héctor Terán

Junta solapada (Lap joint)

Forma de unión en que los extremos a unir se colocan uno cubriendo al otro. (Figura .



Figura 4 Junta a solape
Ilustración: Héctor Terán

Junta de esquina (Corner joint)

Forma de la unión en que los bordes a unir están colocados en ángulo, en forma tal que ninguno de los dos sobresalga por detrás de la cara externa del otro elemento de unión. (Figura 5). Las piezas se encuentran colocadas relativamente a un ángulo aproximado de 90° formando una L.

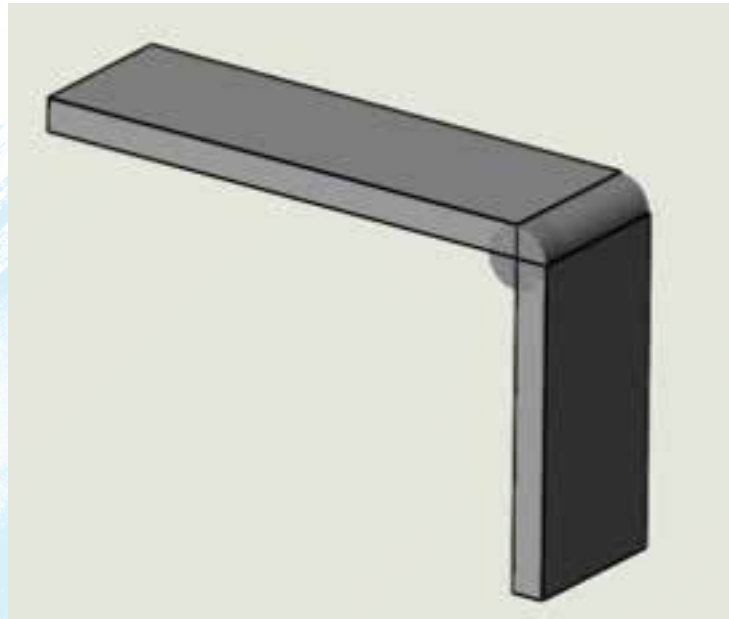


Figura 5 Junta de Esquina
Ilustración: Héctor Terán

Junta por los bordes (Groove joint)

Forma de unión en que las superficies laterales de dos piezas están en contacto y que la costura de soldadura se realiza por los bordes (Figura 6).



Figura 6 Junta por los bordes
Ilustración: Héctor Terán

Costura (Weld)

Metal solidificado en la junta terminada. La costura está formada por uno o varios cordones. (International, 2003)

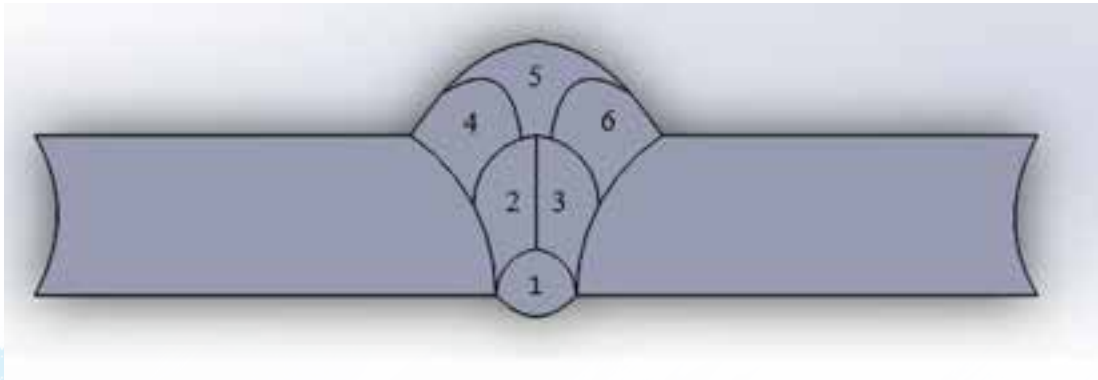


Figura 7 Costuras y Cordones
Ilustración: Héctor Terán

Cordón (Cord)

Metal solidificado en una pasada.

Material base (Base metal)

Pieza o material a soldar.

Material de aporte (Filler metal)

Material de la varilla, electrodo, alambre, etc. que se utiliza para soldar.

Borde (Groove)

Superficie de contacto entre las partes a unir donde se realiza la soldadura. Son las superficies del material base preparada o no donde se realiza la acción de soldar y entra en contacto el material de aporte. Los espesores pequeños no requieren preparación de los bordes, pero cuando este aumenta es necesario prepararlos para poder fundir la raíz de la futura costura o parte posterior de ella. En la Norma Cubana 08-06:82 se puede seleccionar la forma adecuada de preparación de bordes y en general pueden ser a tope sin preparación de bordes (square groove), con preparación en V (single V groove), en X (double V groove), etc. (ASM Handbook Committee, 1971)

Angulo del bisel (Bevel angle)

Angulo comprendido entre la superficie de un borde preparado para soldar y una línea de referencia.

Generalmente se designa por la letra a. (Figura 8)

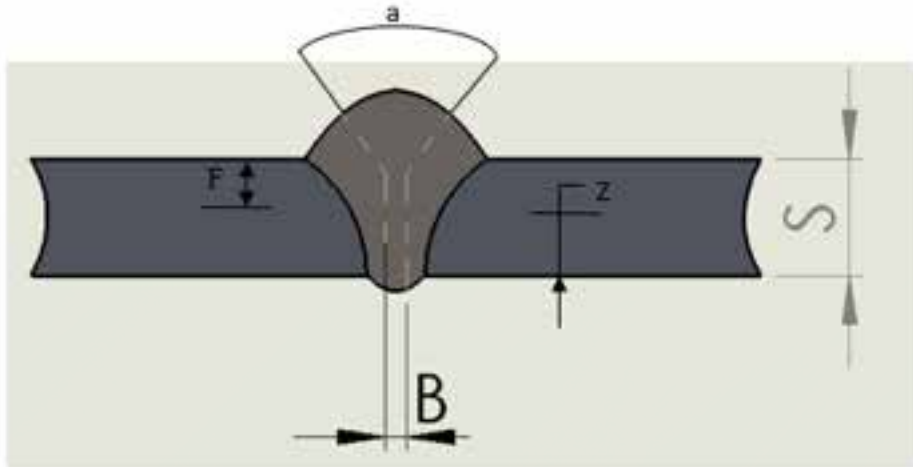


Figura 8 Dimensiones geométricas de la preparación de los bordes
Ilustración: Héctor Terán

Donde:

a → ángulo del surco

B → abertura de la raíz

F → profundidad del bisel

S → espesor de la plancha

z → altura de la raíz

Altura del bisel (Height of groove)

Es la distancia existente entre la parte superior del material base o pieza y la arista donde se interseca la cara del ángulo del bisel con la cara de la raíz. En ocasiones se designa por la letra "F" (Figura 8). (AWS, 1966)

Raíz de la costura (Root of weld)

Parte del fondo de la cavidad o zona a soldar. Es donde se interseca la cara de la raíz con la parte posterior del material base. (Figura 9)

Separación de la raíz (Root gap)

Distancia que se deja entre la cara de una pieza y la otra o contra la cara de una raíz y la otra. (Figura 8). Se designa por la letra "a". (Allegheny Ludlum Steel Corporation, 1976)

Altura de la raíz (Height of root)

Es la distancia existente entre la superficie posterior del material base y la arista que se forma.

Cuando se interseca la cara de la raíz y la del ángulo del bisel. En ocasiones se designa por la letra "z". (Figura 8). La suma de la altura del bisel y la de la raíz es igual al espesor de la pieza. (Aluminum Company of America, 1954)

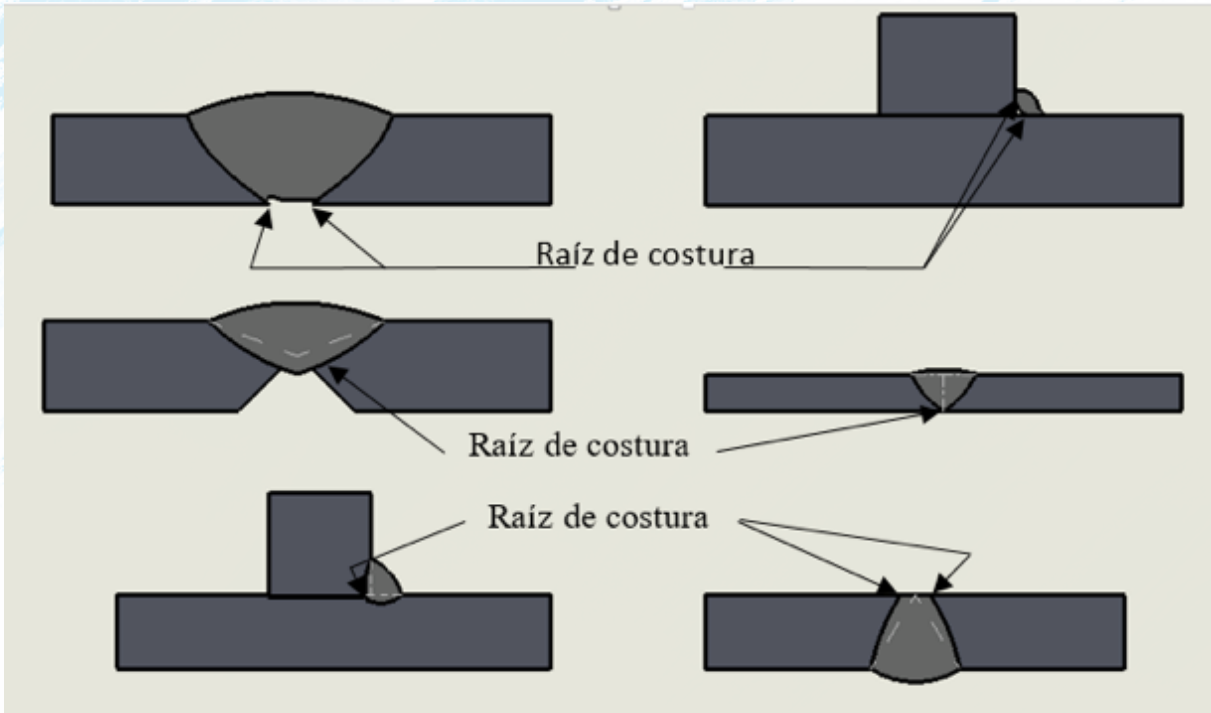


Figura 9 Raíz de la costura
Ilustración: Héctor Terán

Ancho de la costura (bread of weld)

Distancia que hay entre los bordes laterales de una costura, usualmente representado por la letra "b". (Figura 10)

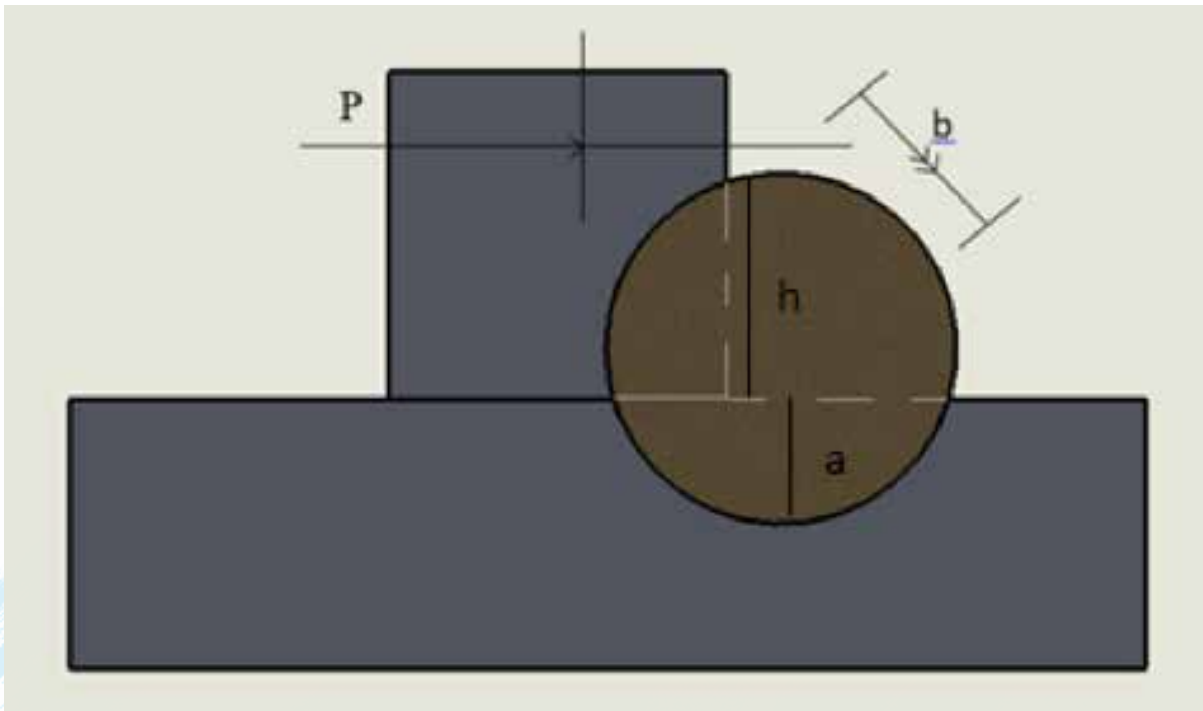


Figura 10 Dimensiones geométricas de la costura
Ilustración: Héctor Terán

Donde:

b → ancho de costura

B → es la abertura de la raíz

h → altura del refuerzo

a → penetración

Sobre espesor de la costura

Cantidad de metal depositado que sobresale desde la superficie superior de la pieza o de la garganta teórica de la costura. (Figura 10)

Altura del refuerzo (Height of reinforcement)

Es la distancia entre la parte superior de la costura y la superficie superior del material base, tal como se muestra en la Figura 10. Generalmente se designa por “ h ”.

Penetración (Penetration)

Distancia desde la superficie primitiva (superior) del metal base hasta el punto donde cesa la fusión. Se representa por la letra “ a ” (Figura 10)

Zona fundida.

Es el metal líquido que se ha solidificado, el cual ha sufrido durante la fusión y solidificación, transformaciones del tipo físico-químico o estructural. (Amo, 1985)

Zona de influencia térmica

Zona del material base afectado térmicamente hasta la temperatura de mínima de transformación del material en cuestión.

En esta zona se pueden producir cambios micro estructurales que pueden variar o no las propiedades mecánicas. (Figura 11)

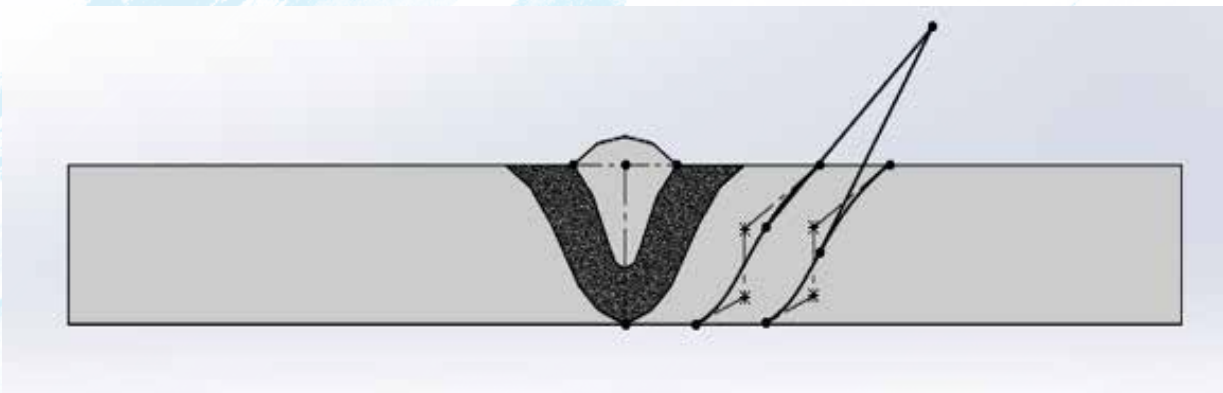


Figura 11 Zona fundida y de influencia térmica
Ilustración: Héctor Terán

Zona de transición (Bond line)

Zona entre la costura y el material base (Figura 11).

Isotermas (Isothermal)

Es el lugar geométrico obtenido por la unión de puntos de igual temperatura en el material base o en la zona de influencia térmica (Figura 11). (Amo, 1985)

Coefficiente de dilución (Coefficient of dilution)

Es la relación en porcentajes del material base fundido y la suma del material base y el de aporte fundidos en un punto determinado de la costura.

Secuencia o método de soldadura hacia atrás (Backstep secuencia)

Es la secuencia o método de soldadura mediante la cual los cordones se depositan en contra de la dirección normal de estos, tal como se observa en la Figura 12.

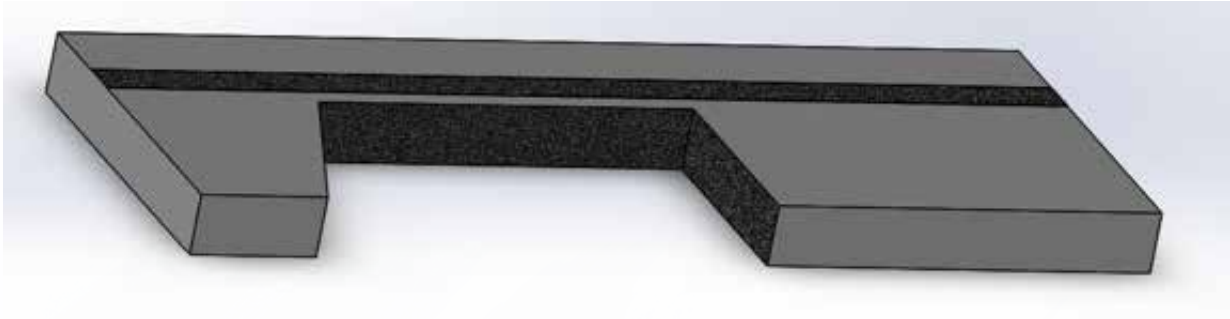


Figura 12 Secuencia o método de soldadura hacia atrás
Ilustración: Héctor Terán

Secuencia o método de soldadura en cascada. (Cascade secuencia)

Es la secuencia o método de soldadura mediante la cual los cordones se depositan uno arriba del otro en forma de solape (Figura 13).

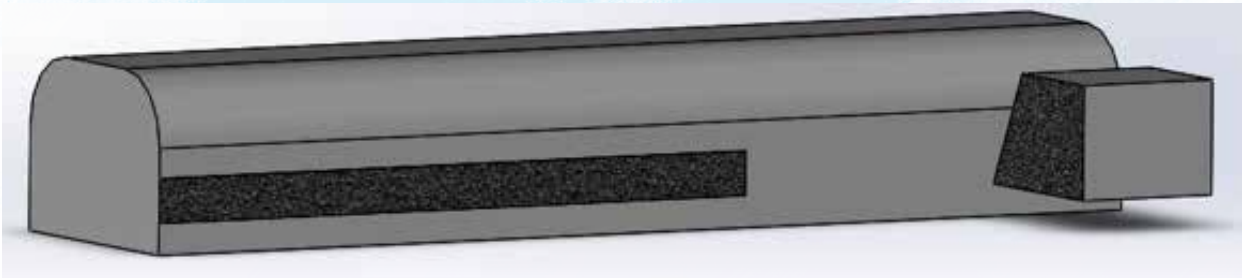


Figura 13 Secuencia o método de soldadura en cascada
Ilustración: Héctor Terán

Clasificación de los procesos de soldadura.

En la actualidad existe una gran variedad de procesos de soldadura (welding process) los cuales se han perfeccionado y desarrollado debido al impetuoso avance de la ciencia y la técnica. Estos procesos de soldadura cuyo objetivo fundamental es lograr la unión indesarmable de dos o más piezas, se clasifican atendiendo al tipo de energía en tres grandes grupos que son: soldadura por fusión, con calor y presión y por presión. (Heriberto, 2011).

Soldadura por fusión. (Fusion welding)

Procedimiento mediante el cual la unión de las partes se realiza sólo por una fuente de calor concentrado hasta su fusión.

En estos procedimientos no se aplica presión y pueden utilizar o no material de aporte que puede ser de la misma o de diferente composición química a la del material base. (Heriberto, 2011).

Soldadura con calor y presión. (Welding with heat and pressure)

Procedimiento mediante el cual la unión de las partes se realiza con la aplicación de la energía en forma de calor y presión.

En estos procedimientos el calor que se aplica puede o no fundir las piezas.

Soldadura por presión (Welding with pressure)

Procedimiento mediante el cual la unión de las partes se realiza con la aplicación de energía en forma de presión.

Soldadura heterogénea. (Brazing welding)

Proceso en el cual se utilizan metales y aleaciones de diferente composición química que el metal base.

En estos procesos generalmente se utiliza calor el cual funde solamente el material de aporte que es de distinta composición química que el del material base; en algunos casos puede aplicarse presión. (Costuras de las uniones soldadas. Tipos y elementos de diseño, s.f)

Soldadura fuerte (Strong welding).

Grupo de procedimientos de soldadura en los que el material de aporte es un metal o aleación no ferrosa y en los que el punto de fusión es superior a 400 °C, pero inferior al del material base. La unión soldada se efectúa por difusión. (Aguilar, 1991)

Soldadura blanda (Soft welding)

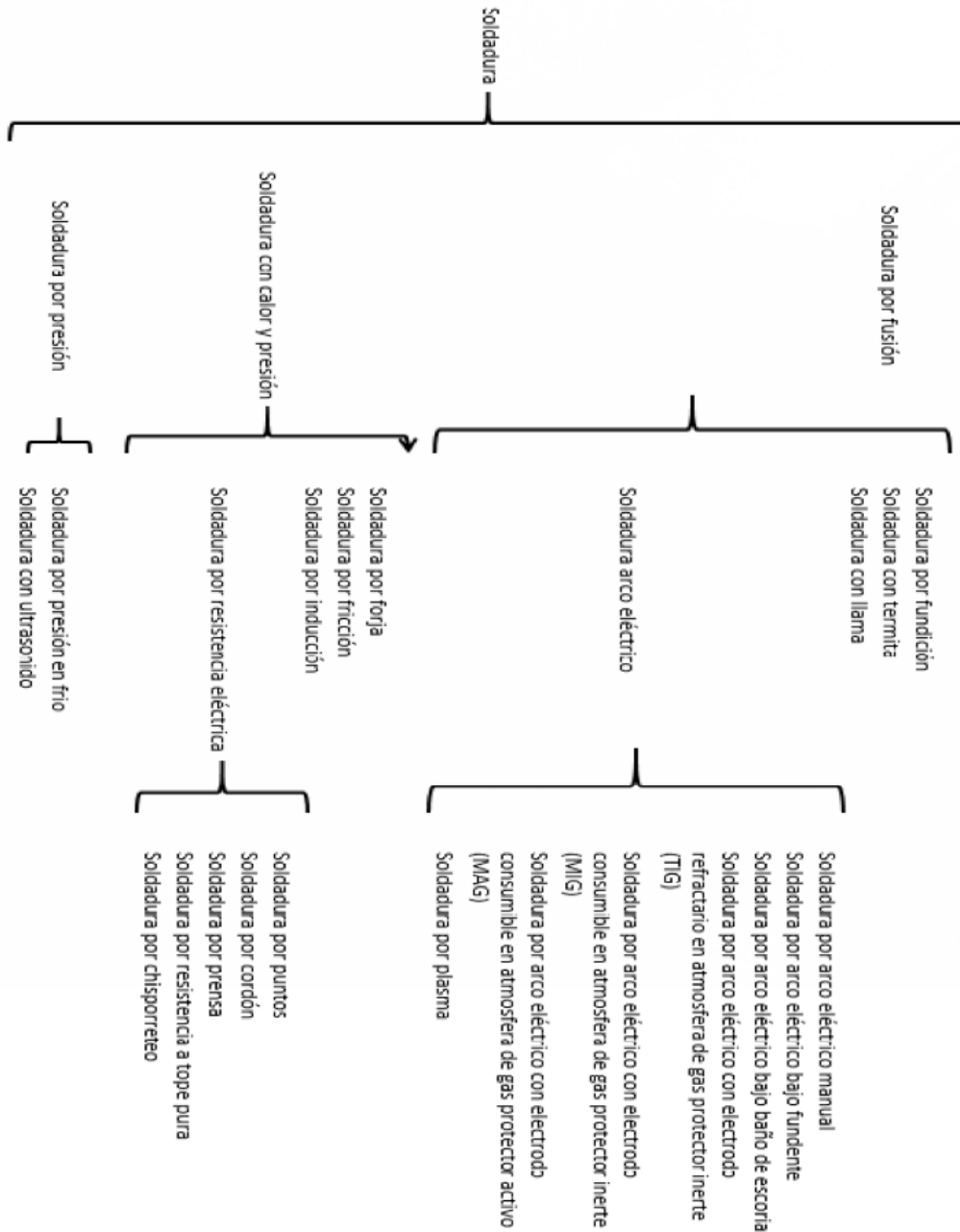
Procedimiento de soldadura en el que el metal de aporte es un metal o aleación no férrea que se hace principalmente a base de estaño y plomo y en el que el punto de fusión es inferior a 400 °C. (Jeffus, 2009)

Principales procesos de soldadura.

A continuación, se exponen solo algunos de los procesos de soldadura de los cuales se hacen referencia en el texto. (Esquema N°1) (Amo, 1985)

ESQUEMA No 1

CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA



Soldadura por fundición (welding of casting).

El metal de aporte se funde fuera del lugar de la pieza a soldar y después, con un sobrecalentamiento, se vierte en el molde cuyas paredes están formadas por las piezas a unir. Durante la primera etapa de la colada se calientan los bordes de soldadura hasta fundirlos; después se unen con el resto del metal de aporte moldeado entre dichos bordes (Figura 14). Con el enfriamiento, las piezas quedan soldadas. Es un proceso utilizado en las reparaciones de piezas de hierro fundido en general. (Howard, 2002)

La forma moderna de este proceso es la soldadura con termita, en la cual el metal de aporte se obtiene por la reducción del hierro en una mezcla aluminotérmica.

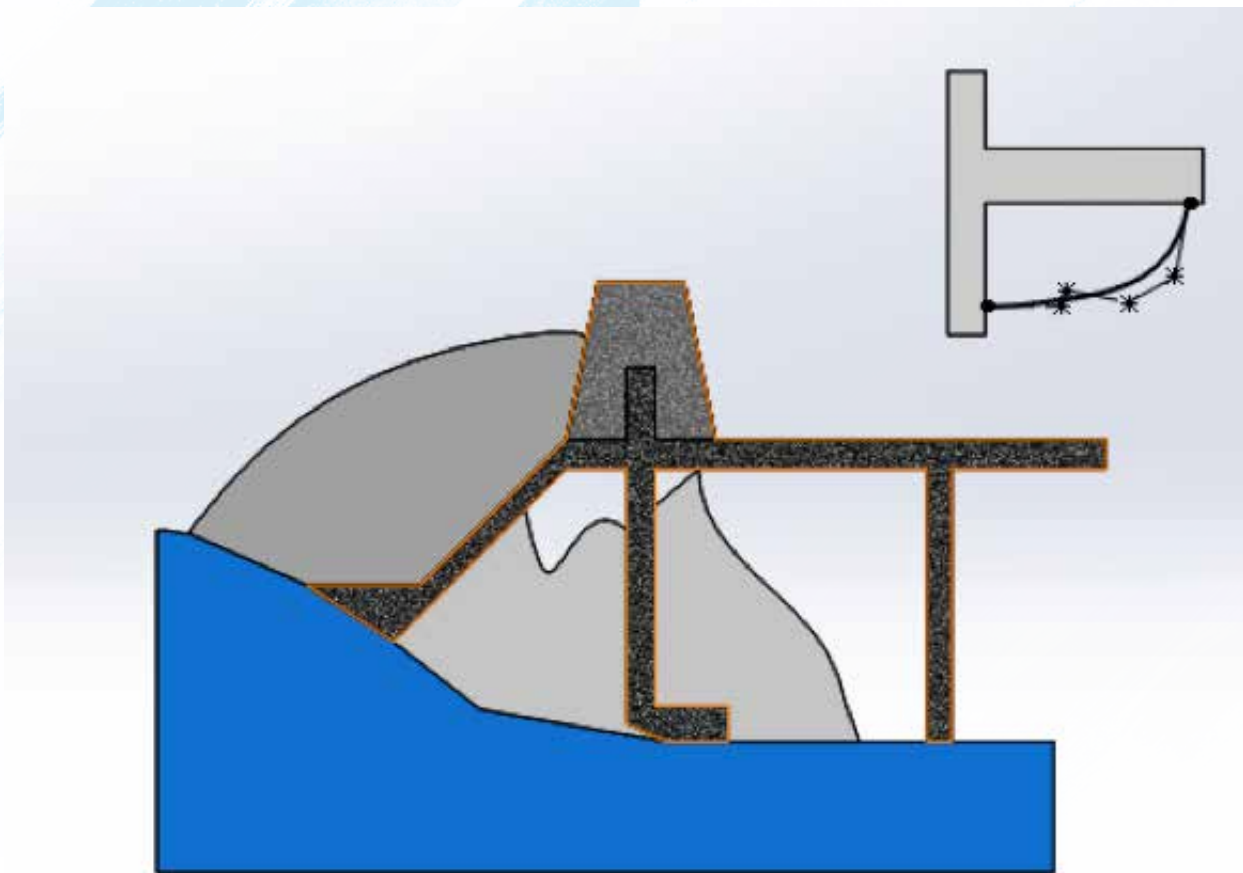


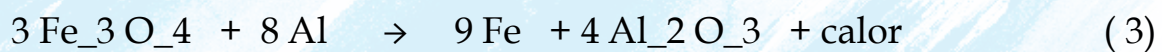
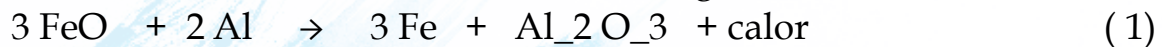
Figura 14 Soldadura por fundición
Ilustración: Héctor Terán

Soldadura con termita (Thermit welding).

Los bordes de soldadura de las piezas a unir, se funden con el calor de la reacción química entre el óxido de metal y el aluminio, finamente divididos,

lo cual constituye la mezcla de termita (thermit mixture). El metal reducido fundido que se encuentra entre los bordes, constituye el metal de aporte que con el enfriamiento crea la unión soldada (Figura 15). Este procedimiento de soldadura se utiliza desde 1899 y fue patentado por Goldschmidt para las uniones de raíles. En el año 1902 se aplicó a raíles de ferrocarril en Budapest y el tiempo de soldadura se disminuyó con la aplicación del precalentamiento del molde. (Howard, 2002)

Las reacciones aluminotérmicas son las siguientes:



En algunos casos, se ha utilizado también el silicio y el magnesio en lugar del aluminio.

La termita es una mezcla que consta principalmente de magnetita (Fe_3O_4) y polvo de aluminio. Las proporciones de cada componente son 3 partes de óxido por una parte de aluminio.

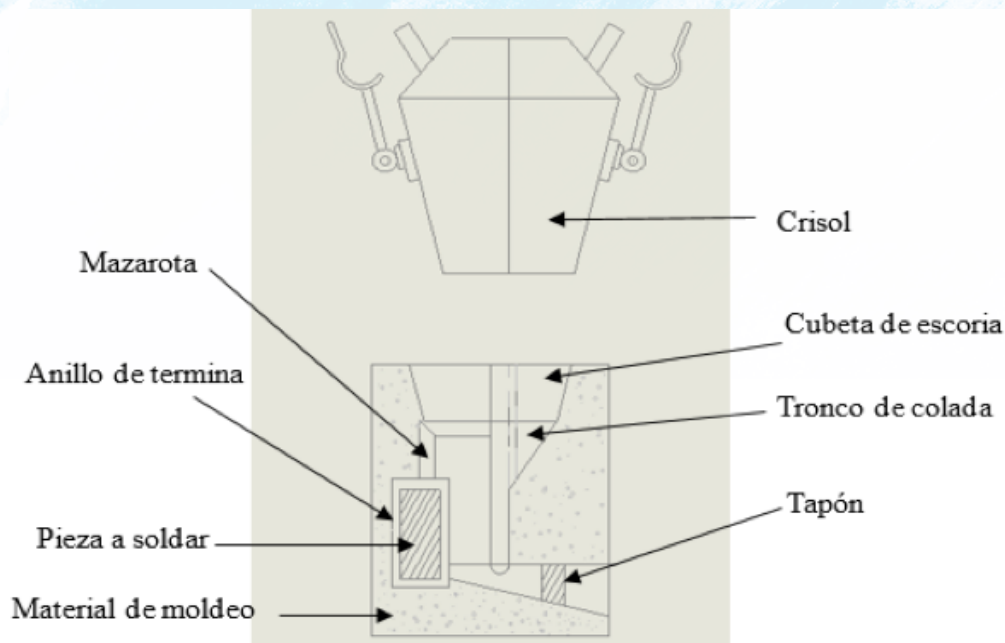


Figura 15 Proceso de soldadura con termita
Ilustración. Héctor Terán

El proceso de soldadura con termita se aplica en espesores grandes (>100 mm) en las vías de sistemas de transportación por ferrocarril. Los raíles de ferrocarril presentan diferentes tipos de deterioro entre los cuales se encuentran: impacto, fatiga, desgaste, grietas, porosidad, etc.; estos se pueden reparar por procesos de soldadura manual y semiautomática por arco eléctrico; no obstante, en el caso de la soldadura de raíles, el proceso de soldadura con termita es más conveniente. (Manual técnico, s.f)

Soldadura con llama (gas welding)

Comprende el grupo de procedimientos de soldadura que utiliza la llama que se produce en el quemado de gases combustibles con el oxígeno. Con la llama se funden localmente los bordes de soldadura y el material de aporte, en caso de utilizarlo. (Materiales para soldar, s.f)

Soldadura por arco eléctrico. (Arc welding).

Comprende el grupo de procesos de soldadura que utiliza el calor desarrollado por el arco eléctrico. El arco se produce entre un electrodo y el metal base, o entre dos electrodos, y funde localmente los materiales a unir. Estos procesos pueden trabajar con corriente alterna (A C arc current) o con corriente directa (D C arc current).

Soldadura por arco eléctrico manual (Manual arc welding)

En este proceso el arco eléctrico surge como una descarga eléctrica en un medio gaseoso altamente ionizado entre un electrodo y la pieza a soldar, tal y como se observa en la Figura 16. (CIME, 1993)

En el proceso el soldador es el encargado de establecer el arco eléctrico (cebado), alimentar el electrodo al baño metálico, mover el electrodo y desplazarlo a una velocidad lo más uniforme posible, y todo esto tratando de mantener una longitud del arco constante. (Welding Handbook, 1990)

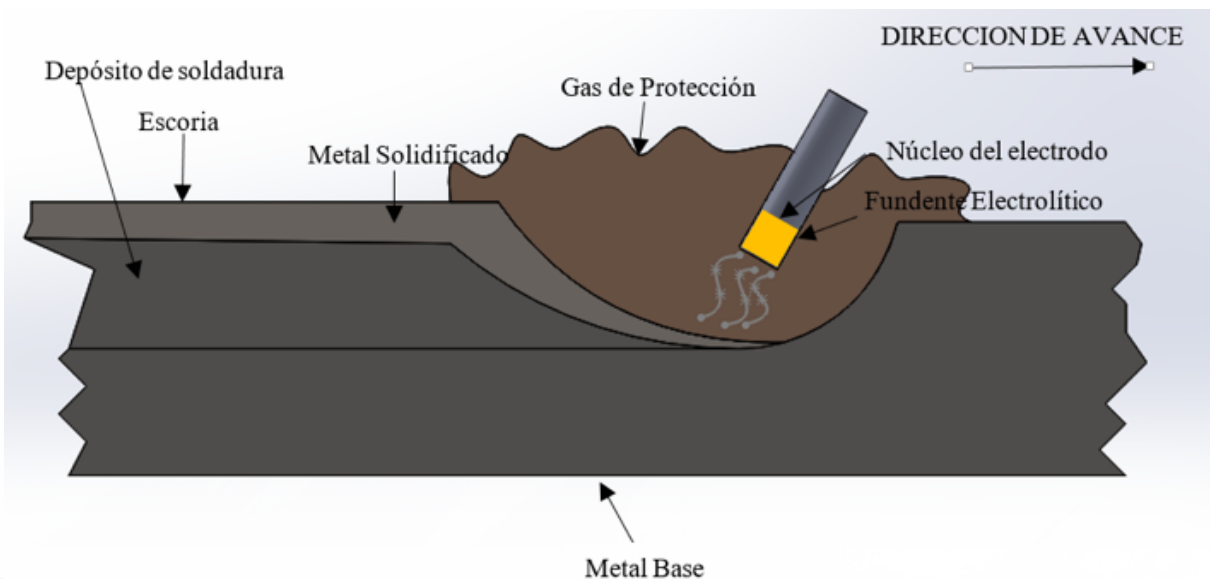


Figura 16 Esquema del arco eléctrico empleado en soldadura manual
Ilustración. Héctor Terán

Soldadura automática por arco eléctrico bajo arco sumergido (Submerged arc welding).

Los procesos de soldadura automática (automatic arc welding) tienen como objetivo el de aumentar la productividad del trabajo y esto se logra, entre otras cosas aumentando la densidad de la corriente y eliminando el cambio de electrodos, mediante el uso del material de aporte con un rollo de alambre desnudo (welding wire); en el caso de la soldadura bajo arco sumergido el arco eléctrico se logra bajo un colchón de fúndente que cumple, entre otros aspectos, las funciones del revestimiento del electrodo en la soldadura manual. En la Figura 17 se muestra un esquema del proceso de soldadura automática bajo arco sumergido. (Cottrell, 1985)

Soldadura semiautomática por arco eléctrico con electrodo consumible en atmósfera de gas protector inerte (MIG). (Inert gas shielding arc welding).

Estos procesos de soldadura por fusión se designan por las iniciales de su denominación en idioma inglés (Metal Inert Gas).

En estos procesos la protección del baño metálico se garantiza con un gas inerte que rodea el arco eléctrico (gas shielding arc welding) y que no reacciona con el mismo. El esquema del proceso se ilustra en la Figura 18. (González & Molina, 1994)

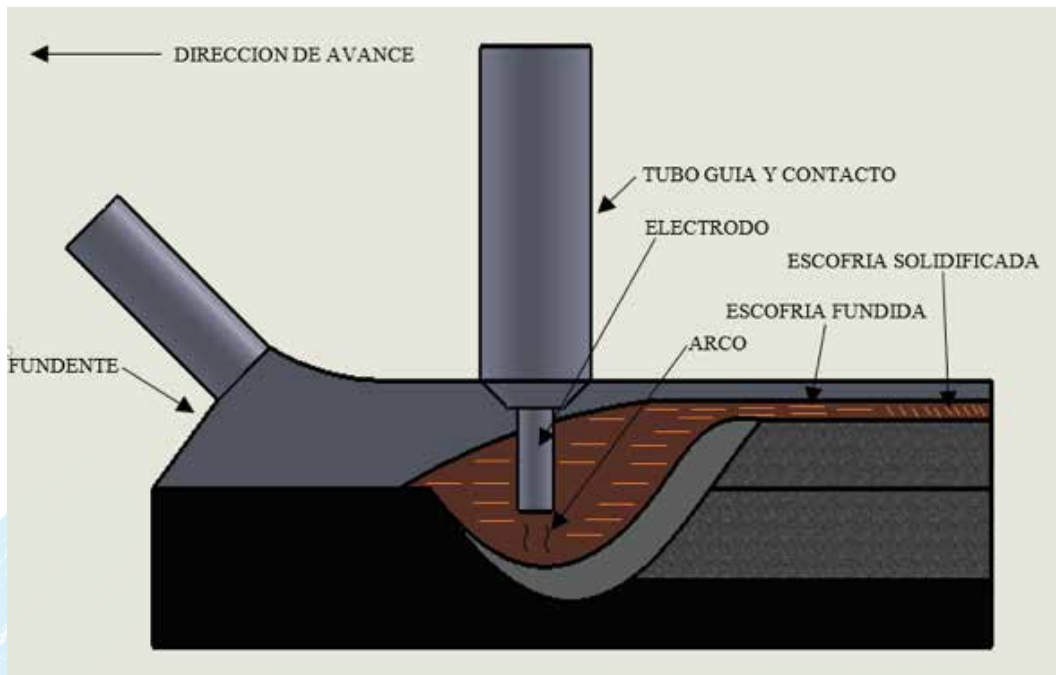
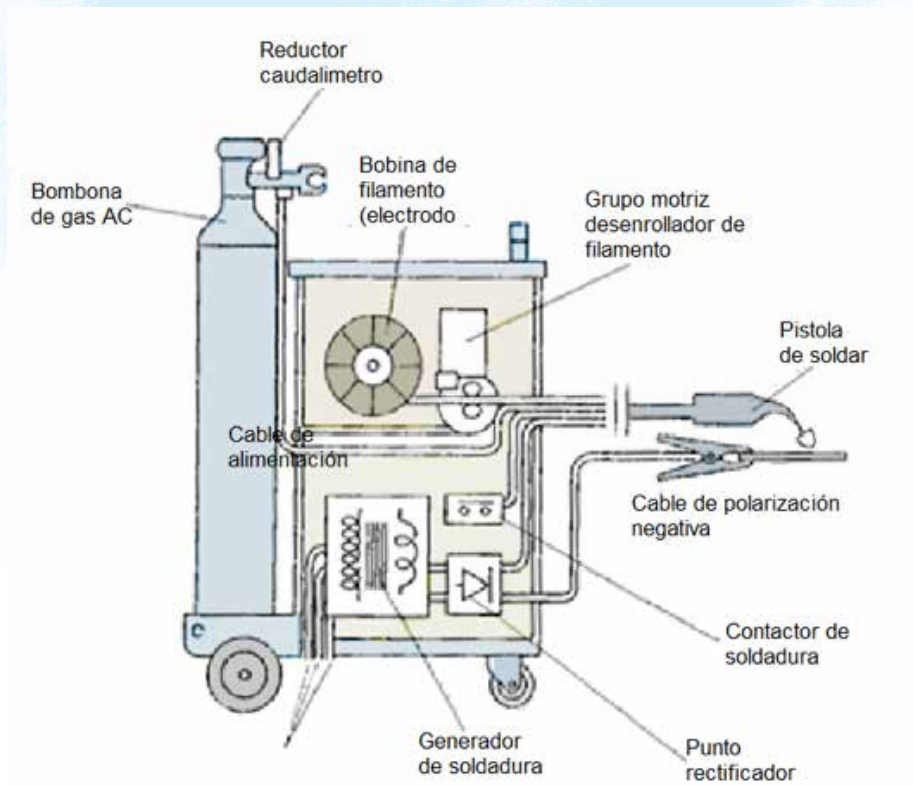


Figura 17 Soldadura por arco sumergido
Ilustración. Héctor Terán Figura



18 Esquema del proceso de soldadura semiautomática bajo gas protector inerte
Ilustración. (LINCOLN ELECTRIC, 2017)

Soldadura semiautomática por arco eléctrico con electrodo consumible (consumable electrode) en atmósfera de gas protector activo (MAG). (CO₂ gas shielded arc welding, MAG welding).

Estos procesos de soldadura por fusión se designan por las iniciales de su denominación en idioma inglés (Metal Active Gas). En estos procesos la protección del baño metálico se garantiza con un gas activo (CO₂) que rodea el arco eléctrico y que reacciona con el mismo. El esquema del proceso es similar al de la Figura 18, con la única variación del tipo de gas.

Soldadura por arco eléctrico con electrodo refractario en atmósfera de gas protector inerte (TIG). (Gas tungsten arc welding)

Este proceso de soldadura por fusión se designa por las iniciales de su denominación en idioma inglés (Tungsten Inert Gas).

En estos procesos el calor se produce por el arco eléctrico entre un electrodo refractario (no consumible) (non consumable electrode) y la pieza a soldar. El electrodo para conducir la corriente es de tungsteno o una aleación de este. El material base calentado, el metal fundido y el electrodo refractario son protegidos por una atmósfera de gas inerte alimentado de un balón de gas a través del soplete. Un esquema del proceso se ilustra en la Figura 19.

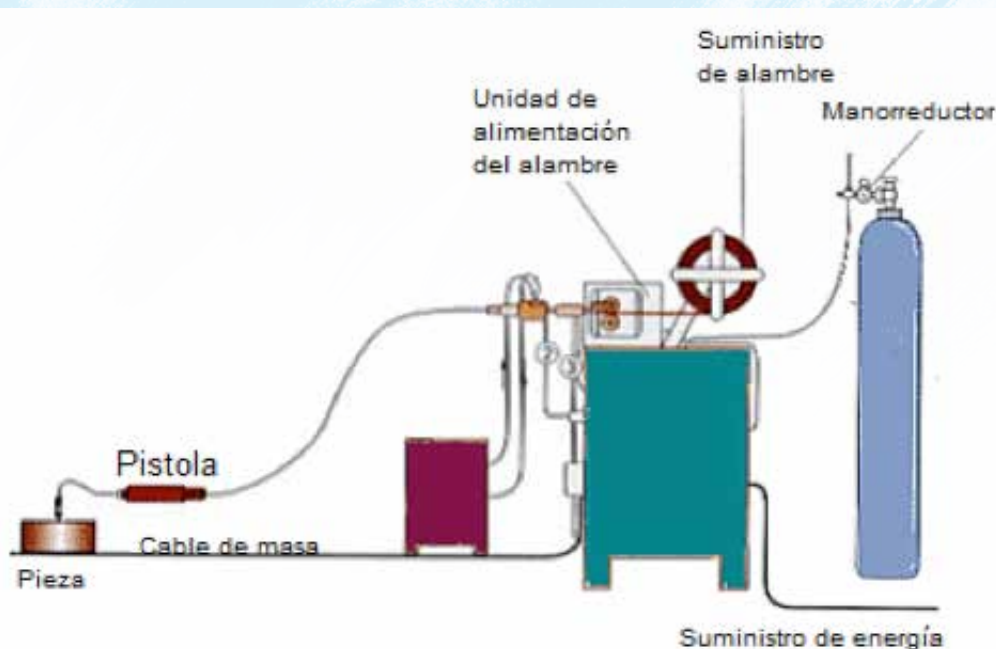


Figura 19 Esquema del proceso de soldadura por arco eléctrico refractario en atmósfera de gas protector inerte Ilustración. (LINCOLN ELECTRIC, 2017)

Soldadura por forja (Forge welding)

Consiste esencialmente en calentar las piezas a unir hasta el estado plástico a alta temperatura y luego se aplica presión a las mismas para completar la unión soldada. La presión se aplica generalmente con golpes de martillo, aunque también se utilizan prensas de forja.

Para este proceso es necesario asegurar una gran limpieza de los bordes de soldadura. Con el calentamiento por debajo del “solidus”, se aumenta principalmente la plasticidad de los materiales; en estas condiciones, la compresión acerca los bordes limpios hasta una distancia muy pequeña, en la cual se establecen los fenómenos de difusión que crean una buena soldadura. (Martínez, 2000)

Soldadura por fricción (Friction welding)

Utiliza el calor que se desarrolla en la fricción mutua entre los materiales a unir; es decir, el calor necesario para realizar la soldadura se logra por el cambio de energía mecánica en energía calórica.

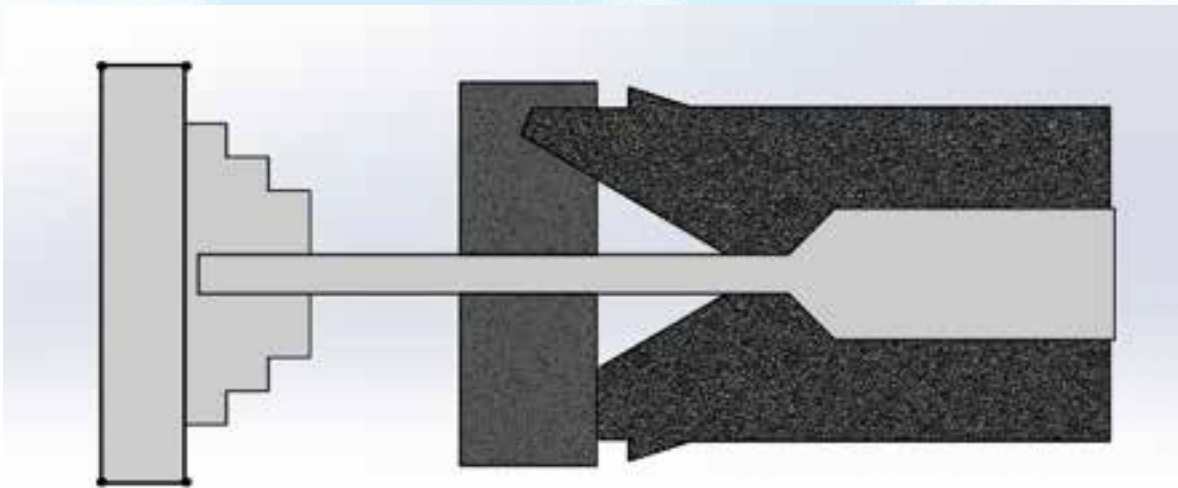


Figura 20 Soldadura por fricción
Ilustración. Héctor Terán

Un esquema de este procedimiento se muestra en la Figura 20. Una de las piezas a soldar se coloca en el plato de sujeción del torno, de modo que exista contacto con la otra pieza que se encuentra inmóvil en la contrapunta.

Cuando la pieza rota, se crea una fricción en las superficies de contacto que desarrolla calor. Cuando se alcanza la temperatura de soldadura, se para la rotación de la pieza y luego ambas se comprimen y se sueldan. (Japanese Standard Association, 1987)

Los bordes de soldadura deben estar limpios de grasas y otras impurezas, en general, los bordes sucios dificultan la soldadura, pero no la evitan, ya que las impurezas son quemadas y expulsadas de la zona de la unión. En la unión soldada terminada queda una rebaba.

Se pueden soldar aceros al carbono y aleados, cobre, aluminio y sus aleaciones.

Soldadura por resistencia eléctrica (Resistance welding).

El calor necesario para fundir localmente los materiales a unir, se logra con el paso de una corriente eléctrica a través de un circuito, una parte del cual está constituido por los bordes de soldadura. La unión se completa con la fuerza que actúa sobre las piezas a soldar.

La energía calórica Q desarrollada por una corriente de intensidad I al atravesar un circuito de resistencia óhmica R durante el tiempo (dt), está dada por la clásica fórmula de Joule:

$$Q = 0.239 \int_0^t I^2 R dt \quad [J, A, \Omega, s] \quad (4)$$

Donde:

R: Resistencia eléctrica [Ω]

I: Intensidad de corriente [A]

T: Tiempo de soldadura [s]

La resistencia eléctrica R que aparece en la fórmula anterior, es la suma de varias componentes, tal como se muestra en la Figura 21.

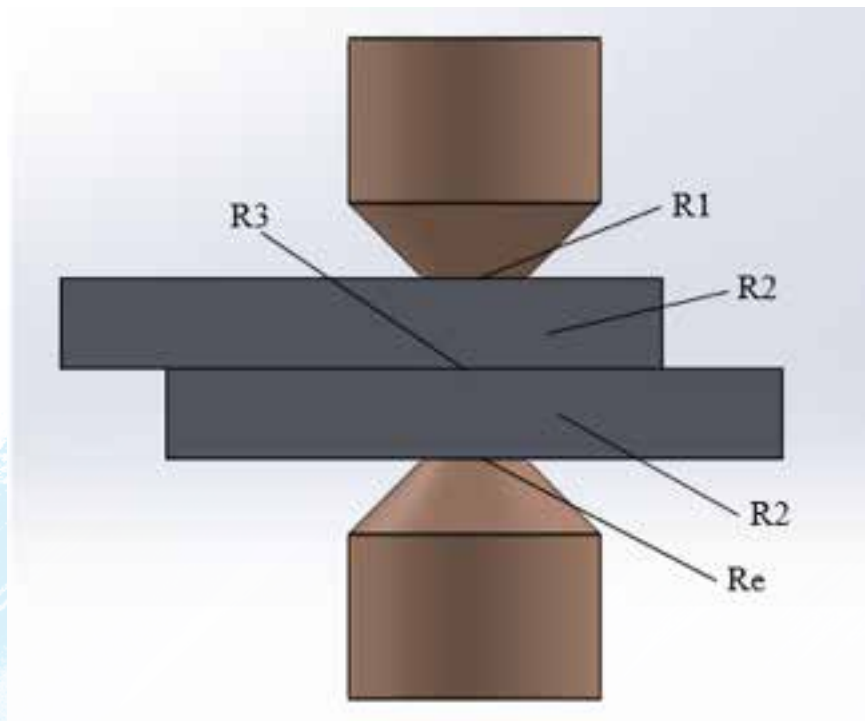


Figura 21 Componentes de la resistencia de soldadura
Ilustración. Héctor Terán

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (5)$$

Donde R_1 y R_5 , son las resistencias de contacto entre el electrodo y los materiales a unir; R_2 y R_4 son las resistencias propias de los materiales y depende de la naturaleza del metal o aleación, y R_3 es la resistencia de contacto entre ambos materiales y su valor ha de ser grande, pues es la que interviene directamente en la fusión de los bordes de soldadura.

La energía mecánica se desarrolla por la presión ejercida sobre los electrodos durante las diversas fases del ciclo de soldadura. Al comienzo, durante el período de acercamiento, la presión tiene como objeto romper la capa de óxido con el fin de asegurar el contacto entre las chapas que se han de soldar; durante el período del paso de la corriente además de mantener en posición las chapas y facilitar el paso de dicha corriente, el efecto de la presión es eliminar el rechufe que tiende a formarse y completar la unión soldada.

Según el modo de aplicación de la energía calórica y de la presión, la soldadura por resistencia eléctrica puede ser: por puntos, cordón, prensa y resistencia pura.

Soldadura por ultrasonido (Ultrasonic welding).

Por los bordes de soldadura comprimidos se hace pasar una vibración mecánica de frecuencia ultrasónica. El proceso de soldadura se efectúa sin suministrar energía calórica. Con este procedimiento se sueldan los bordes de soldadura por la acción simultánea de una energía de frecuencia ultrasónica y una fuerza de compresión. Para realizar la unión soldada es necesario un generador de ondas (oscilador) con una potencia de algún KW.

PARTICULARIDADES DE LOS PROCESOS METALÚRGICOS EN LOS PROCESOS DE SOLDADURA.

Los procesos de fusión y solidificación de los metales, que en la mayoría de las ocasiones originan cambios en la composición química y en la estructura cristalina, se denominan metalúrgicos.

La soldadura también es un proceso metalúrgico, que presenta dos caracteres esenciales estos son: la fusión y la localización de ésta.

La soldadura considerada como un proceso de fusión solamente es semejante a tres procesos muy conocidos que son: proceso de fundición, de tratamiento térmico y metalúrgico. Se asemeja a un proceso de fundición debido a que se lleva el material hasta el estado líquido, para que luego se solidifique en un molde, el cual lo constituyen los bordes de soldadura, con la particularidad de que las paredes de este molde, o sea los bordes generalmente participan en el proceso de fusión; a un proceso de tratamiento térmico debido a que las paredes adyacentes a la zona fundida están sometidas a un calentamiento y enfriamiento en estado sólido, que es variable de acuerdo con la distancia a que se encuentre el punto considerado de la zona fundida y que, por lo tanto, se considera como un tratamiento térmico variable de acuerdo a la distancia del punto considerado en el material base adyacente a esta zona, y por último como un proceso metalúrgico debido a las reacciones que ocurren entre la zona fundida y el medio que rodea ésta durante la solidificación, que bien puede ser un fundente, un gas protector, etc.

Sin embargo, considerando el segundo carácter de los procesos de soldadura, es este el que los diferencia de los tres anteriores, debido a que si la fusión fuese total se pudiera considerar como un proceso de fundición

acompañado de reacciones metalúrgicas, si por el contrario el calentamiento fuese total se pudiera considerar como una operación de tratamiento térmico.

A modo de resumen se pueden considerar los procesos de soldadura también como procesos metalúrgicos, pero diferenciándolos de estos por las siguientes particularidades:

1. Ocurren a altas temperaturas de calentamiento.
2. Se efectúan a una gran velocidad.
3. Los volúmenes de metal calentado y fundido son pequeños.
4. La conducción del calor de la zona fundida hacia el material base en estado sólido es muy rápida.
5. En la zona fundida actúan los gases y las escorias que lo rodean durante la ejecución del proceso.
6. El material de aporte se emplea para formar parte del material de la costura y en muchas ocasiones tiene una composición química diferente a éste.

Las altas temperaturas de calentamiento durante los procesos de soldadura aceleran rápidamente los procesos de fusión del material de aporte, material base, revestimiento y fundentes, teniendo lugar durante este proceso la evaporación, salpicaduras y la oxidación de los materiales y elementos que participan en las reacciones químicas de la zona fundida. A estas altas temperaturas las moléculas de oxígeno, nitrógeno e hidrógeno se descomponen parcialmente en átomos, alcanzando una actividad química mayor que en estado molecular y ocasionan la oxidación de los elementos, la saturación del metal con nitrógeno y la absorción de hidrógeno con más intensidad, en estos procesos de soldadura, que en los procesos metalúrgicos propiamente dichos.

Los pequeños volúmenes de metal fundido y la rápida conducción del calor hacia el material base ocasionan la corta duración de las reacciones químicas en la zona fundida, las cuales no siempre pueden llegar hasta el final. Por otro lado, tenemos la aceleración de los procesos de solidificación y cristalización del metal de esta zona, lo cual se refleja en la estructura final de la misma, así como también en la zona de influencia térmica.

La composición química, la estructura y la densidad del material de la costura dependen de composición química del material base y de aporte, del tipo de gas que rodea a esta zona, del régimen de soldadura, etc.

Las particularidades estudiadas de los procesos metalúrgicos durante la soldadura dificultan la obtención de uniones soldadas de elevada calidad, sobre todo cuando se trata de materiales sensibles al rápido calentamiento y enfriamiento, debido a que estos pueden presentar dificultades, tales como: oxidación de algunos elementos, porosidad, agrietamiento, formación de estructuras de temple, etc. Por esta razón a la hora de fabricar o reparar una pieza mediante los procesos de soldadura se debe proyectar una tecnología correcta que tengan en cuenta factores tales como: material de aporte y régimen de soldadura adecuados, revestimientos y fundentes correctos, aplicación de un precalentamiento y en algunos casos también de un tratamiento térmico posterior, etcétera.

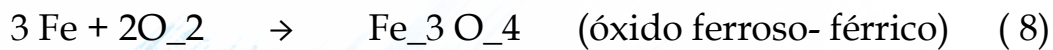
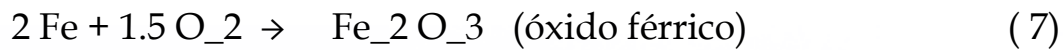
REACCIONES QUE OCURREN EN EL BAÑO METÁLICO

El objetivo esencial que nos ocupa en este tópico es el estudio de las principales reacciones que se producen en la zona fundida de los aceros, como materiales de uso más común en la industria y se deja el estudio de otros materiales para la tecnología de soldadura de cada uno de ellos en particular.

El principal problema que se presenta en la soldadura de los aceros es la obtención de una zona fundida con la menor cantidad posible oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo e hidrógeno, debido a que estos elementos disminuyen las propiedades mecánicas de las uniones soldadas. El oxígeno es el elemento más perjudicial, puesto que oxida el metal de la zona fundida mediante la formación de óxidos. Estos pueden ser: solubles en el metal líquido, los que posteriormente son absorbidos por el metal durante la solidificación formando una solución sólida, e insolubles, los cuales salen del metal en el momento de la solidificación: pasando una parte a la escoria, y otra queda en el metal de la costura en forma de inclusiones esféricas o situándose en los límites de los granos reduciendo también el grado de cohesión entre ellos. (Azuse, 1967)

Los óxidos solubles e insolubles disminuyen las propiedades mecánicas de las uniones soldadas tales como: resistencia, elasticidad, alargamiento y fluidez, y también influye perjudicialmente en otras propiedades, tales como: disminuye la resistencia a la corrosión, eleva la tendencia al envejecimiento, etc. A continuación, se realiza el estudio de los procesos de oxidación

y desoxidación, y su interrelación con los elementos de la escoria en la formación de la unión soldada. El oxígeno forma con el hierro tres tipos de óxidos según las siguientes reacciones:



Al comienzo de la oxidación se forma primero el óxido ferroso (FeO), el cual tiene la particularidad de disolverse en el metal líquido, posteriormente bajo determinadas condiciones de temperatura, relaciones de hierro y oxígeno, etc., puede convertirse en otras formas de óxidos; el metal fundido puro puede disolver hasta 0,22 % de oxígeno en forma de óxido de hierro, mientras que en el acero es de 0,035 %, debido a que cuando aumenta el contenido de carbono en la aleación disminuye la solubilidad; el exceso de oxígeno en el acero cuando sobrepasa el límite de solubilidad, sale de la solución en forma de óxido ferroso - férrico y se sitúa en los límites del grano del metal. (Azuse, 1967)

El oxígeno se combina fácilmente con el carbono, manganeso, silicio y otros elementos que se encuentran en la composición química del material base, electrodos, varillas, fundentes y revestimientos, formando los respectivos óxidos de estos elementos. La oxidación de los elementos puede ocurrir en la zona del arco donde el oxígeno en estado atómico y con gran actividad química puede formar estos óxidos o en la reacción de estos elementos con el óxido de hierro (FeO) en el baño de metal fundido. Por estas razones el contenido de algunos elementos del metal de la costura puede disminuir grandemente afectando la composición de la misma.

La presencia de óxidos en la costura es un factor completamente negativo para las uniones soldadas, por lo tanto, para obtener una costura de alta calidad se hace necesario la protección de esta de la acción del oxígeno del medio ambiente, esta protección se comienza creando una atmósfera de gas protector y escorias que aíslan físicamente el oxígeno de la zona del metal fundido, sin embargo, con esto no se alcanza una protección completa del

metal contra la oxidación y por esto se utiliza otro método para evitar la permanencia de óxidos en el metal fundido, que es añadir elementos químicos que tienen mayor afinidad por el oxígeno que el hierro y que forman unos óxidos de menor solubilidad en el metal líquido que el óxido de hierro (FeO), a este proceso se le denomina comúnmente como desoxidación y tiene una influencia preponderante en los procesos de soldadura, ya que garantiza una costura de alta calidad. La cantidad de oxígeno en el metal de la costura depende de la influencia de la atmósfera de gas protector, la escoria y los elementos químicos de mayor afinidad que el hierro. (Azuse, 1967)

Las reacciones de oxidación y desoxidación están gobernadas por la siguiente ecuación:



Donde:

m: Número de moléculas del metal M

n: Número de moléculas de oxígeno

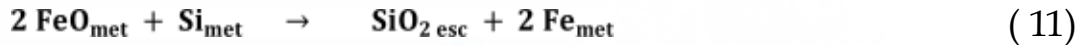
La flecha superior indica la oxidación y la inferior la reducción. A determinadas proporciones de metal y oxígeno, todo el sistema puede estar en equilibrio a una temperatura y a una presión determinada, entonces en un volumen dado de la materia se encuentra el metal puro y su óxido; este estado se caracteriza por la constante de equilibrio del sistema (K), dada por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{(\%M)^m (O_2)^{n/2}}{(\%M_m O_n)} \quad (10)$$

En primer lugar, se realizará la oxidación con aquellos elementos que tengan mayor afinidad química por el oxígeno y a medida que se oxiden estos elementos su concentración en la zona de reacción disminuirá, así como su velocidad de oxidación, posteriormente comenzarán a oxidarse con mayor intensidad los elementos de menor afinidad por el oxígeno. Esto también sucederá en el proceso inverso (reducción).

El orden de los elementos según el índice de su actividad química con respecto al oxígeno es el siguiente: Al, Ti, V, Si, C, Mn, y Cr. Estos elementos se incorporan al baño fundido procedente del material de aporte, revestimiento o fundentes, los cuales reaccionan con los óxidos del metal. El aluminio no se

utiliza como desoxidante debido a que su óxido (Al_2O_3) no se disuelve en el metal líquido y pasa lentamente a la escoria, además que el aluminio favorece la oxidación del carbono, lo que provoca la porosidad de la costura. Los materiales que contienen desoxidantes y que se emplean en las aleaciones de hierro son: ferromanganeso, ferro silicio, ferro titanio y otros. Las reacciones típicas de desoxidación (reducción) mediante el Si y Mn son las siguientes:

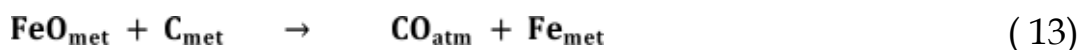


El óxido de silicio y el de manganeso no se disuelven en el metal líquido y pasan a la escoria. El óxido de manganeso y de hierro desde el punto de vista químico tiene carácter básico y pueden reaccionar con los óxidos ácidos formando silicatos del tipo $2 FeO \cdot SiO_2$; $2 MnO \cdot SiO_2$ y titanitos del tipo $2 FeO \cdot TiO_2$ que pasan a la escoria. Los óxidos atendiendo a sus propiedades químicas pueden ser ácidos o básicos, entre los ácidos tenemos el óxido de silicio (SiO_2) y el bióxido de titanio (TiO_2) y entre los básicos tiene el óxido de calcio (CaO), óxido de hierro (FeO), óxido de manganeso (MnO), óxido de sodio (Na_2O), óxido de potasio (K_2O) y el óxido de magnesio (MgO).

Si en las escorias que se forman durante el proceso de soldadura predominan los óxidos ácidos se puede decir que los revestimientos y fundentes que los originan serán también ácidos y viceversa si el predominio es de óxidos básicos. (B.A, 1980)

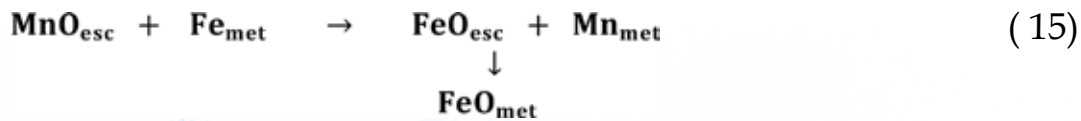
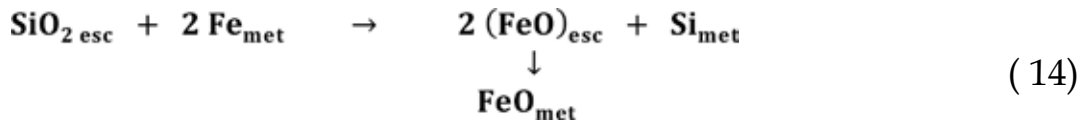
En la soldadura con electrodos de revestimiento ácido, el proceso de desoxidación ocurre también a base del carbono que se encuentra en el baño fundido y de las aleaciones de hierro que se suministran mediante el revestimiento o el fundente generalmente en forma de ferromanganeso.

La reacción de desoxidación mediante el carbono es la siguiente:



El óxido de carbono en forma gaseosa (CO) no se disuelve en el metal líquido y sale de este provocando una gran ebullición, razón por la cual se denomina a los revestimientos ácidos efervescentes.

El óxido silicio (SiO₂) y el óxido de manganeso (MnO) reaccionan con el hierro del baño de soldadura, debido a las altas temperaturas existentes en el mismo según las siguientes ecuaciones:



Estas reacciones ocurren en la línea de separación existente entre la escoria y el metal líquido. Con las altas temperaturas el óxido de hierro (FeO) que se forma durante la reacción se disuelve en el metal líquido y posteriormente, durante el enfriamiento, este óxido reacciona con otros elementos del metal fundido tales como: Cr, Si y Mn, formándose hierro puro y los óxidos de esos elementos que se pueden quedar en la costura. Por esto cuando se sueldan aceros que contienen alto contenido de Si, Cr y Mn, no se utilizan revestimientos ni fundentes con altos contenidos de Si y Mn, debido a que estos conllevan un aumento de oxígeno en la costura. (Banks, 1971)

Los revestimientos y fundentes básicos forman una escoria básica en la que predomina el (CaO), que no desoxida el metal, por eso es necesario introducir en los mismos ferro silicio y ferro titanio, los cuales si desoxidan el metal de la costura según las ecuaciones siguientes:



Estas reacciones ocurren sin la formación gaseosa y por tal razón a estos revestimientos se les denominan también pasivos o calmados. Los revestimientos básicos dan un metal depositado de elevadas propiedades mecánicas.

Como resultado de las reacciones de desoxidación que tienen lugar en el baño de fusión se aumenta el contenido de silicio desde 0,1 a 0,3 % y de manganeso desde 0,7 a 1 %.

Si la cantidad de silicio es insuficiente, la desoxidación puede ocurrir a base del carbono con la formación del CO correspondiente y queda parte de

este en la costura formando poros gaseosos; por esta razón para disminuir la desoxidación mediante el carbono se aumenta el contenido de silicio en el metal de la costura de 0,2 a 0,3 %. Si se disminuye la cantidad de silicio en la costura hasta 0,12 % o menos resulta inevitable la formación de una gran cantidad de poros. (Basista & Plamen, 1966)

El nitrógeno producto de las altas temperaturas pasa parcialmente a su estado atómico aumentando su actividad química; posteriormente en el proceso de enfriamiento el nitrógeno sale de la solución y reacciona con el metal y sus óxidos formando nitruros (F2 N, F4N), los cuales aumentan la resistencia y la dureza, pero disminuye la tenacidad.

La soldadura por arco eléctrico con arco largo y electrodos desnudos produce mayor saturación de nitrógeno en el metal que la soldadura con llama oxiacetilénica, siendo el contenido de nitrógeno en el metal de la costura al soldar con electrodos desnudos de 0,12 a 0,2 %. Aumentando la intensidad de la corriente se disminuye el contenido de nitrógeno en la costura. Cuando se aumenta el contenido de carbono y manganeso en el metal de aporte se reduce considerablemente el contenido de nitrógeno. Al soldar con electrodos de revestimiento grueso el contenido de nitrógeno en el metal de la costura es bajo estando aproximadamente entre el 0,005 y 0,15%.

El azufre es una inclusión perjudicial en el acero, debido a que él forma el sulfuro de hierro (FeS) que tiene una temperatura de fusión de 1 193°C; más baja que la del acero. Esto provoca que cuando se produce la cristalización del acero, el sulfuro de hierro permanece en estado líquido en las capas inter cristalinas de la aleación, siendo, además, una de las causas por las cuales se forman las grietas en caliente de la soldadura. El sulfuro de hierro se elimina introduciendo manganeso, formándose el sulfuro de manganeso debido a una mayor afinidad por el azufre que el hierro, estas ecuaciones se dan a continuación. (Bernstein, 1965)

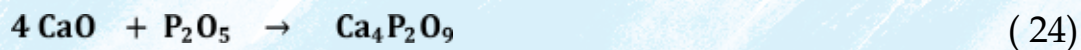
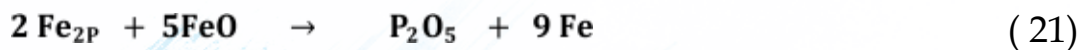


El MnS no se disuelve en el metal líquido, sino que pasa a la escoria.

El óxido de calcio favorece también la eliminación del sulfuro de hierro según la siguiente ecuación:



El fósforo afecta la homogeneidad del metal de la costura, favorece el aumento del tamaño del grano y es el causante del agrietamiento en frío. Se encuentra en el metal de la costura en forma de fosfuros de hierro, Fe₃P y Fe₂P. Las reacciones de estos fosfuros con el óxido de hierro y posteriormente con el óxido de calcio son las siguientes:



Los componentes de fósforos que se obtienen como resultado de las reacciones anteriores pasan a la escoria. Las escorias básicas extraen mejor el fósforo que las ácidas.

El hidrógeno a la temperatura del arco se descompone a la forma atómica teniendo la particularidad de disolverse en el baño de soldadura. Durante el enfriamiento y la solidificación del metal de la costura éste se recombina y una parte de él no puede salir del baño ocasionando la aparición de poros con grandes tensiones que en muchas ocasiones originan grietas en el metal, por esta razón el hidrógeno constituye una inclusión perjudicial en el acero.

Las posibles fuentes para la disolución del hidrógeno en el baño de soldadura son las siguientes: humedad en el revestimiento del electrodo y en el fundente, el aire de la atmósfera alrededor del baño, el agua y el rocío que se encuentra sobre la superficie del metal, óxidos posibles en la varilla de soldar o en los bordes de soldadura. (Boniszewski, 1971)

La absorción de hidrógeno por el baño de soldadura disminuye cuando se utiliza CDPI, sin embargo, aumenta cuando se emplea CA, debido a que en el cambio de polaridad la tensión eléctrica es cero y el baño no se encuentra protegido porque este se apaga en este instante y es el momento propicio

para que se disuelvan en él los átomos de hidrógeno. El hidrógeno atómico puede también desoxidar el metal del baño según la siguiente ecuación:



Las principales recomendaciones para evitar la absorción de hidrógeno en el baño de soldadura son las siguientes:

1. Deben secarse bien los electrodos y los fundentes que se utilizan en los procesos de soldadura, con el objetivo de disminuir al máximo la humedad. El régimen de secado es el que el fabricante recomienda para el material de aporte en cuestión. Se recomienda que los soldadores que ejecutan el proceso de soldadura al aire libre mantengan los electrodos en recipientes lo más herméticos posibles y envueltos en amianto. Si el trabajo se ejecuta en condiciones lluviosas, el puesto de trabajo debe ser protegido de la humedad con lonas, madera, etc.
2. Debe garantizarse el mínimo de humedad existente en la atmósfera que rodea el futuro lugar de soldadura, así como en los bordes de la pieza, por lo que se recomienda un ligero calentamiento a estas partes.
3. La zona donde se va a ejecutar el proceso de soldadura debe estar completamente libre de herrumbre, por eso es necesario limpiarla y secarla correctamente eliminando la humedad en estos lugares.
4. En soldadura de tuberías deben taparse los extremos para evitar la circulación de aire húmedo por el interior.
5. Se deben utilizar electrodos y varillas sin herrumbre.
6. En la soldadura automática bajo fundente se recomienda la utilización de pocos cordones, debido a que los cordones superiores saturan las capas inferiores durante la fusión de éstas.



CAPÍTULO 2

Estructuras de las Uniones Soldadas

INTRODUCCIÓN.

En la mayoría de los procesos de soldadura se utilizan formas de energía a base de calor y/o presión concentrados y en muchas ocasiones estas pueden ser móviles o estacionarias, ocasionando efectos diferentes en las piezas a unir. En el presente capítulo se estudian cómo afectan los diferentes factores de los procesos de soldadura en los cambios estructurales en las piezas en las dos zonas más importantes de las uniones soldadas que son la fundida y la de influencia térmica.

FUENTES DE CALOR. CICLOS TÉRMICOS

Existe un gran número de procesos de unión de materiales que utilizan de una forma u otras fuentes de calor, las cuales pueden lograr fundir o no las piezas que serán objetos de dicha unión, entre estos tenemos los siguientes: procesos de soldadura por arco eléctrico, con llama, con termita, por resistencia eléctrica por fricción, etc. Pero todos tienen la particularidad de lograr la unión soldada en una zona relativamente pequeña. Estas fuentes de calor pueden o no desplazarse para obtener la unión de las piezas en una longitud determinada, tal como ocurre en los procesos de soldadura por arco eléctrico, con llama, por resistencia eléctrica (cordón) o en una zona específica con la fuente de calor estacionaria, como, por ejemplo, en los procesos de soldadura por fricción, por resistencia eléctrica (puntos), etcétera.

La aplicación de estas dos formas de fuentes de calor concentradas, es decir, las móviles y las estacionarias originan en la zona de unión de las piezas calentamientos y enfriamientos más o menos prolongados, lo cual ocasiona que las uniones soldadas estén sometidas a variaciones o ciclos térmicos.

Las fuentes de calor que se utilizan en los procesos de soldadura por arco, con llama, por resistencia eléctrica, etc., tienen la particularidad de tener la máxima cantidad de calor o temperatura en el centro disminuyendo paulatinamente hacia los extremos, esto, conjuntamente con el desplazamiento o no de dichas fuentes de calor, ocasiona la fusión o el calentamiento de una zona localizada, lo cual conlleva a cambios estructurales en la zona de unión que dependen entre otras cuestiones de la forma de distribución de calor en la fuente utilizada. Estos cambios estructurales están determinados en general por el ciclo térmico a que está sometida la zona de unión de las piezas, el cual depende de muchos factores entre los que se pueden citar los siguientes:

naturaleza de la fuente, parámetros energéticos empleados (intensidad de corriente eléctrica, tensión eléctrica, poder de combustión, velocidad de desplazamiento de la fuente de calor (welding speed); uniformidad o no en este desplazamiento; distancia de la fuente de calor a la pieza, tipos de gases que rodean la zona de unión, etcétera.

Los ciclos térmicos a que están sometidas las piezas, están determinados esencialmente por las formas de entrega de calor a éstas y pueden ser más o menos severos, ocasionando en mayor o menor grado problemas tales como: deformaciones, tensiones residuales que pueden en muchos casos originar el agrietamiento o la rotura total de las piezas y cambios estructurales en éstas. Estos problemas tienen relación directa con 3 cuestiones fundamentales que son: el alto gradiente térmico de la zona de influencia térmica; la susceptibilidad de las piezas a la deformación y el agrietamiento, y en muchas ocasiones el desarrollo de los procesos de soldadura en piezas que no tengan libre dilatación, o sea, que la dilatación durante el calentamiento y la contracción durante el enfriamiento, estén limitadas.

ZONAS ESTRUCTURALES DE LAS UNIONES SOLDADAS

El estudio metalúrgico en los procesos de soldadura requiere la consideración de cambios físico - químicos o estructurales en la zona de fusión del material y de cambios en las propiedades mecánicas y estructurales en la región adyacente a ésta. Estos fenómenos se deben analizar integrando tres consideraciones fundamentales que son: el material de la costura se funde y solidifica bajo condiciones similares a la de los procesos de fundición, donde los bordes de soldadura juegan en papel similar a los del molde; el material adyacente a la zona de fusión no se funde, pero se encuentra a altas temperaturas las cuales disminuyen desde el centro de la fuente de calor hacia la zona no calentada, esto ocasiona que esta parte de la pieza se encuentre sometida a un tratamiento térmico variable de acuerdo con el punto considerado y por último las reacciones químicas que ocurren en la zona de fusión. Sin embargo, independientemente de este análisis integral debe diferenciarse que todos estos fenómenos ocurren en una zona relativamente pequeña.

Analizando la macro estructura de una unión soldada se pueden distinguir dos partes fundamentales, tal como se observa en la Figura 21, que son: la zona fundida y la de influencia térmica. (Dixon, 1983)

La zona fundida la constituye el material líquido que se ha solidificado y en el cual ocurren toda una serie de transformaciones físico-químicas o estructurales. Esta zona está compuesta algunas veces solamente del material base fundido, pero en la mayoría de las ocasiones está compuesta por la fusión del material base con el de aporte, dependiendo la relación de estos, en la costura, de factores tales como: tipo de proceso utilizado, parámetros energéticos, diámetro del material de aporte, etc. ; por ejemplo, en los procesos de soldadura manual por arco eléctrico la cantidad de material base que pasa a la costura es aproximadamente un 10 % del total de esta, mientras que en los procesos de soldadura automática bajo fundente con diámetros de electrodos entre 4 y 5 mm, esta cantidad se eleva hasta un 50%. El material de la zona fundida se diferencia del material de aporte por su composición química, estructura y propiedades.

La zona de influencia térmica es la zona del material base adyacente a la zona fundida que no ha sufrido fusión, pero que producto del calentamiento o aplicación de otras formas de energía se producen cambios en la microestructura que pueden variar las propiedades mecánicas.

En esta zona se origina un tratamiento térmico variable, de acuerdo con la distancia desde el centro de la costura a las zonas adyacentes de esta, hasta el punto de la mínima temperatura de transformación del material en cuestión.

En este capítulo se estudian las transformaciones que ocurren en la zona fundida y en la zona de influencia térmica desde un punto de vista general, debido a que en temas posteriores se particularizan los fenómenos concernientes a diferentes tipos de materiales tales como: aceros al carbono, aleados, hierros fundidos, materiales no ferrosos. etc., cuando se estudia la soldabilidad de cada uno de ellos.

ZONA FUNDIDA. FORMACIÓN DE LA COSTURA

El material que compone la zona fundida puede tener la misma composición química que el material base, como ocurre en las uniones soldadas ejecutadas sobre bordes rectos sin material de aporte en procesos de soldadura por arco, con llama, por resistencia eléctrica, etc., o puede tener una composición química resultante de la mezcla del material base y aporte cuando este último se utiliza en el proceso.

Existen condiciones que ayudan a una variación en la composición química final de la zona fundida o costura, éstas son: las altas temperaturas del proceso, los fundentes y los revestimientos, tipo de proceso utilizado, etc. Sin embargo, estas cuestiones tienen su regulación con el objetivo de obtener una zona fundida con la calidad requerida.

En la zona fundida donde el metal pasa del estado líquido al sólido, ocurren toda una serie de transformaciones físico-químicas o estructurales que se estudian a continuación y que se pueden agrupar en la forma siguiente:

1. Modificaciones químicas.
2. Absorción de gases.
3. Precipitación de compuestos de la solución sólida.
4. Transformaciones eutécticas.
5. Modificaciones estructurales.

Modificaciones químicas

En la zona fundida se desarrollan una serie de reacciones químicas que provocan modificaciones en la misma, como por ejemplo las pérdidas por oxidación de elementos útiles como el carbono en el acero, el silicio en los hierros fundidos, etc.; fijación de elevadas cantidades de carbono, azufre o fósforo por la llama o el revestimiento del electrodo y fijación de elementos especiales procedentes del revestimiento en el baño fundido (molten pool) mediante fenómenos micro metalúrgicos, con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas o químicas de la costura. Existen modificaciones químicas en la zona fundida producto de la absorción de gases tales como: oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, sin embargo, producto de la importancia de este aspecto se estudia como un acápite aparte posteriormente. (Burgos, 1987)

Las modificaciones químicas en la zona fundida se pueden dividir en tres grupos: pérdida de elementos por oxidación, fijación de elementos perjudiciales y fijación de elementos favorables.

Pérdida de elementos por oxidación

En el caso de los aceros, las pérdidas por oxidación se deben a la reducción del óxido de hierro por los elementos componentes de éste, tales como: silicio, manganeso y carbono, tal como se estudia en las ecuaciones (6), (7) y (8). Los óxidos de silicio y manganeso no se disuelven en el metal

líquido y pasan a la escoria, también los óxidos de manganeso y de hierro pueden reaccionar con los óxidos ácidos formando silicatos del tipo $2 \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$; $2 \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ y tita natos del tipo $2 \text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$, que también pasan a la escoria. El óxido de carbono no se disuelve en el metal líquido y sale de éste, pero parte de él puede quedarse ocluido en la costura y dar origen a los poros (pore).

Fijación de elementos perjudiciales.

La fijación de cantidades elevadas de carbono, fósforo o azufre en la zona fundida, por la llama o el revestimiento del electrodo, ocasionan pérdidas en las propiedades mecánicas de ésta. La fijación del carbono en la soldadura con llama oxiacetilénica se debe a una mala regulación de la llama, de manera tal que la costura se realice con una llama carburante. En la soldadura por arco eléctrico la fijación del carbono se debe a ferroaleaciones del revestimiento que contienen este elemento. En algunas ocasiones la fijación del carbono no constituye un hecho perjudicial, como por ejemplo, en el caso de la soldadura de los hierros fundidos, donde es importante la conservación del contenido de este elemento para garantizar la grafitización de estos materiales durante la ejecución del proceso. (CIME, 1993)

El aumento en los contenidos de fósforo y azufre en la soldadura con llama oxiacetilénica se deben a impurezas del acetileno, tales como: el sulfuro de hidrógeno (SH_2) y el fosfuro de hidrógeno (PH_3). En la soldadura por arco eléctrico la causa se debe a las ferroaleaciones del revestimiento que contienen los mismos.

Fijación de elementos favorables.

Los revestimientos de los electrodos tienen entre sus ventajas la de suministrar elementos aleantes a la costura, con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas o químicas a la misma; estos elementos aleantes se suministran al revestimiento en forma de ferroaleaciones granuladas y se puede obtener, por ejemplo, una costura de un acero aleado, con un electrodo en el cual su núcleo metálico sea de acero de bajo contenido de carbono. Desde el punto de vista teórico se puede obtener en la costura cualquier tipo de aleación, sin embargo, estas posibilidades están limitadas en la práctica, debido a que algunas ferroaleaciones causan dificultades en la fusión del

electrodo como son: gran afinidad de algún componente de la aleación por el nitrógeno, disminución de la fluidez del baño, presencia de poros en la costura, etc.

Absorción de gases.

La zona fundida se encuentra rodeada de gases atmosféricos perjudiciales para la obtención de una unión soldada de calidad, estos gases son: oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. (Chevenard & Azcue, 1965)

A las elevadas temperaturas que se desarrollan los procesos de soldadura, la absorción de estos gases por el material de la costura aumenta grandemente, ocasionando modificaciones químicas de importancia y, por tanto, disminución de las propiedades mecánicas de la futura unión soldada.

A continuación, se realiza un estudio de la influencia que tiene la absorción de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno en la zona fundida de los aceros.

Absorción de oxígeno

Se conoce que la cantidad de oxígeno presente en la zona fundida depende fundamentalmente de las reacciones de reducción de los óxidos de hierro, por los elementos tales como: carbono, manganeso y silicio. Sin embargo, en los procesos de soldadura existen otros factores que también inciden en la absorción de oxígeno por la zona fundida, estos son: proceso de soldadura, naturaleza del material de aporte, tipo y espesor del revestimiento y naturaleza de los gases que rodean a la zona fundida. (Taipe, 2013)

En el proceso de soldadura con llama oxiacetilénica, la cantidad máxima de oxígeno que se fija en la costura es de 0,05 %, lo cual es una cifra considerada como pequeña; esto se debe a que la reducción se efectúa casi totalmente por los gases de la llama reductora y muy poca parte por el Mn y el Si.

En la soldadura por arco eléctrico la cantidad de oxígeno en la zona fundida es mayor y puede alcanzar valores de hasta 0,3 %, bajo la forma de óxido de hierro (FeO), sin embargo, con revestimientos que desprenden durante la fusión elementos reductores, la cantidad de oxígeno en la zona fundida puede disminuir hasta un valor de 0,07 %.

En la Figura 21 se observa la influencia del oxígeno sobre las propiedades mecánicas tales como: resistencia (σ), elasticidad (S_1), dureza (H), alargamiento (A) y viscosidad de impacto (K_1). Comparando los resultados

entre los procesos de soldadura con llama oxiacetilénica, donde la máxima fijación de oxígeno en la costura es de 0,05 %, y los procesos de soldadura por arco, en donde la cantidad de oxígeno puede ser mayor de 0,2 %, se nota que todas las propiedades mecánicas disminuyen notablemente para estos últimos procesos, exceptuando el caso del alargamiento (A), el cual no se encuentra afectado por la presencia de oxígeno en la costura.

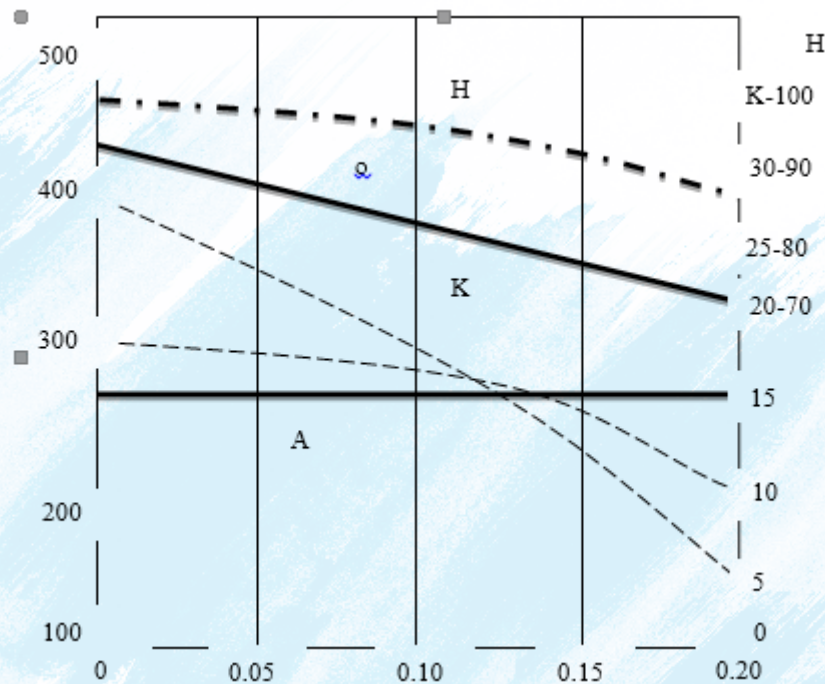


Figura 1 Influencia del oxígeno en las propiedades mecánicas de un acero de bajo contenido de carbono. Ilustración. Héctor Terán

Los materiales de aporte deben tener una cantidad suficiente de manganeso y silicio para favorecer el proceso de desoxidación y evitar que éste se desarrolle basándose en el carbono, lo cual disminuye las propiedades mecánicas por un lado y favorece la formación de poros en la costura. (American Welding Society, 1968)

Los revestimientos ácidos disminuyen el contenido de oxígeno en la costura debido a la reacción entre los óxidos ácidos y los óxidos de hierro que son básicos y dan lugar a los silicatos y tita natos de óxido de hierro, los cuales pasan a la escoria. En los revestimientos básicos la desoxidación se realiza a base de ferroaleaciones de silicio y titanio introducidos en el mismo. Para favorecer la desoxidación se prefieren los revestimientos que

desprendan gases reductores y con espesores de revestimientos gruesos, con el objetivo de poder aislar físicamente el oxígeno de la atmósfera que rodea el baño de soldadura.

Absorción de hidrógeno

La absorción de hidrógeno por la zona fundida también constituye un hecho perjudicial en las uniones soldadas, debido a que disminuye las propiedades mecánicas de las mismas.

La cantidad permisible de hidrógeno para obtener una unión soldada compacta es de $6,5 \text{ cm}^3$ por cada 100 g de metal.

En la tabla 1 se da las concentraciones de hidrógeno expresado en cm^3 por cada 100 g de metal en distintos tipos de materiales y electrodos.

Tabla 1 concentración de hidrogeno para distintos materiales y electrodos

Muestra	C	Mn	Si	O ₂	N ₂	H ₂ (cm ³ /100g)
Hierro dulce ordinario	0.03	0.12	0.01			1-1.2
Hierro dulce enriquecido en H ₂ en estado fundido.	0.03	0.12	0.01			2-5
Acero fundido laminado. FUSION POR ARCO	0.2	0.48	0.3		0.006	1-1.25
Electrodo desnudo	0.04	0.07	0.02	0.22	0.12	1.35
Electrodo con revestimiento Fino.	0.04	0.27	0.03	0.17	0.11	2.25
Electrodo con revestimiento grueso tipo A	0.1	0.48	0.05	0.09	0.016	6-8
Electrodo con revestimiento grueso tipo B	0.08	0.56	0.06	0.08	0.015	8-10
Electrodo con revestimiento grueso tipo C	0.11	0.65	0.56	0.09	0.015	22-25 ¹
Electrodo con revestimiento grueso tipo D	0.13	1.12	0.15	0.06	0.022	31-32 ¹
Electrodo con revestimiento grueso tipo E	0.12	0.6	0.22	0.09	0.008	17.9 ¹

Manchas en forma de copos.

En el análisis de la tabla se nota cómo influye el revestimiento como fuente principal de la absorción de hidrógeno en la zona fundida, ya que como se observa, para electrodos desnudos, la cantidad de hidrógeno en la costura es de $1,35 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$, mientras que en el resto de los electrodos crece este valor considerablemente. Los electrodos A y B, fijan de 6 a 10 cm^3 , debido a las sustancias orgánicas que sirven de aglutinante y del agua químicamente combinada con los silicatos, mientras que los electrodos C y D de revestimientos volátiles fijan una mayor cantidad. Se han encontrado en la soldadura con electrodos celulósicos valores de hasta 85 cm^3 de hidrógeno en la zona fundida.

Se han realizado estudios donde se determina la cantidad presente en el metal de la costura de gases tales como oxígeno, hidrógeno y nitrógeno y la influencia que estos ejercen en la tendencia al agrietamiento de los mismos.

Absorción de nitrógeno

Las altas temperaturas a que se encuentra la zona fundida en los procesos de soldadura ocasionan que el nitrógeno pase parcialmente al estado atómico, aumentando su actividad y provocando la reacción de éste con el metal y sus óxidos, formando nitruros (Fe_2N , Fe_4N), que aumentan la resistencia (σ) y la dureza (H), pero disminuye el alargamiento (A) y la viscosidad de impacto (K_1), o sea la capacidad de deformación de la unión soldada.

La absorción de nitrógeno en la zona fundida de una unión soldada depende de los siguientes factores: proceso de soldadura, naturaleza del material base a soldar, tipo y espesor del revestimiento, gases que rodean la zona fundida y longitud del arco eléctrico (arc length).

La soldadura con llama oxiacetilénica fija poca cantidad de nitrógeno en la costura, siendo aproximadamente de 0.02 %, lo cual no provoca un cambio sustancial en las propiedades mecánicas de la misma, sin embargo, en la soldadura con arco eléctrico puede llegarse a obtener valores de hasta 0,2 %, en las condiciones más desfavorables, o sea, con electrodos desnudos y arco largo, lo cual ocasiona variaciones considerables en las propiedades mecánicas.

En general se puede considerar que en la soldadura por arco eléctrico con electrodo desnudo y longitudes de arco que varían entre 2 y 8 mm. En

aceros de bajo contenido de carbono, se puede lograr una cantidad de 0,15 a 0,2 % de nitrógeno en la zona fundida, sin embargo, algunos elementos disminuyen la tendencia de absorción de nitrógeno por parte de la zona fundida, estos son: carbono, manganeso, silicio y titanio; otros aumentan ligeramente esta tendencia entre ellos tenemos: aluminio, vanadio y uranio, y otros la aumentan fuertemente, tales como: cromo, molibdeno y circonio. (MIKY, 2012)

Cuando se aumenta el contenido de carbono y manganeso en el material de aporte, se disminuye la tendencia a la absorción de nitrógeno en la zona fundida, al igual que al soldar con revestimientos gruesos, donde se puede lograr disminuir hasta valores entre 0,005 y 0,15 %.

La absorción de nitrógeno por parte de la zona fundida aumenta cuando la atmósfera que rodea al baño es rica en este elemento, como, por ejemplo, en atmósfera de nitrógeno puro o amoníaco y disminuye en atmósferas ricas en hidrógeno y óxidos de carbono, por eso se recomienda para la disminución de la cantidad de nitrógeno en la zona fundida, soldar con revestimientos que proporcionen gases reductores durante la fusión.

Al aumentar la longitud del arco se hace más difícil proteger el baño de soldadura del nitrógeno que contiene la atmósfera que rodea el mismo, ya que entonces el efecto físico que realizan los gases del revestimiento, que se producen durante la fusión, tienen que proteger un volumen mayor, lo cual resulta insuficiente.

Precipitación de compuestos de la solución sólida.

La fusión puede provocar la precipitación desde la solución sólida, de un compuesto que conlleve, una variación en las propiedades mecánicas o químicas de la unión soldada.

La precipitación de estos compuestos se estudia posteriormente en los capítulos de soldabilidad de los materiales, no obstante, se darán algunos ejemplos para una mayor comprensión, éstos son: el caso de la soldabilidad regular de los aceros inoxidable austeníticos al precipitarse los carburos de cromo en el rango de temperatura entre 420 y 850 °C, lo cual ocasiona una disminución en la resistencia a la corrosión de estos aceros; otro caso es, en los duro aluminios, los compuestos que afectan la soldabilidad tales como: el Mg_2Si y el $CuAl_{2y}$, en las aleaciones de Al - Mg se precipita el compuesto

Mg₂Al. (Especificación para la soldadura de tubería de acero inoxidable austenítico (W-330) 22p, 1968)

Transformaciones eutécticas.

La soldabilidad de un metal o aleación puede estar condicionada a las transformaciones eutécticas, tal como ocurre en el cobre con oxígeno que provoca la formación del eutéctico Cu-Cu₂O en la zona fundida, lo cual conduce a la fragilidad de la unión soldada.

Modificaciones estructurales

Las modificaciones estructurales en la zona fundida se dividen en dos grandes grupos que son:

1. Modificaciones que estudian la forma, el tamaño y la orientación de los granos.
2. Modificaciones en el estado físico-químico del metal.

Estos dependen, para un acero con una composición química determinada, del ciclo térmico impuesto durante el desarrollo del proceso.

En el estudio del primer tipo de modificaciones estructurales, la formación de los primeros cristales en el metal en estado líquido comienza en las superficies de enfriamiento y alrededor de los denominados centros de cristalización, que se forman en el proceso de solidificación de la zona fundida, de estos centros iniciales se forman los granos de metal con la incorporación de nuevos cristales. Para un metal determinado, el tamaño, la forma y la orientación del grano dependen de la temperatura a la que se ha llevado el metal, el tiempo de permanencia a esta temperatura y la velocidad de enfriamiento al atravesar las líneas de transformación, a mayor velocidad de enfriamiento mayor será la cantidad de centros de cristalización que se forman y los granos serán más finos, mientras que para una velocidad de enfriamiento lenta el metal queda constituido por granos gruesos.

En la soldadura con llama oxiacetilénica en una sola pasada, el metal se mantiene en estado líquido durante un tiempo relativamente largo, lo cual queda determinado por el volumen del metal fundido, o sea, el espesor del material base, por lo que se dice que el tamaño del grano depende dentro de ciertos límites del espesor de la pieza.

La estructura de la zona fundida con llama oxiacetilénica es algo grosera, con una red desarticulada, irregular y sin orientación definida, tal como se muestra en la Figura 22.

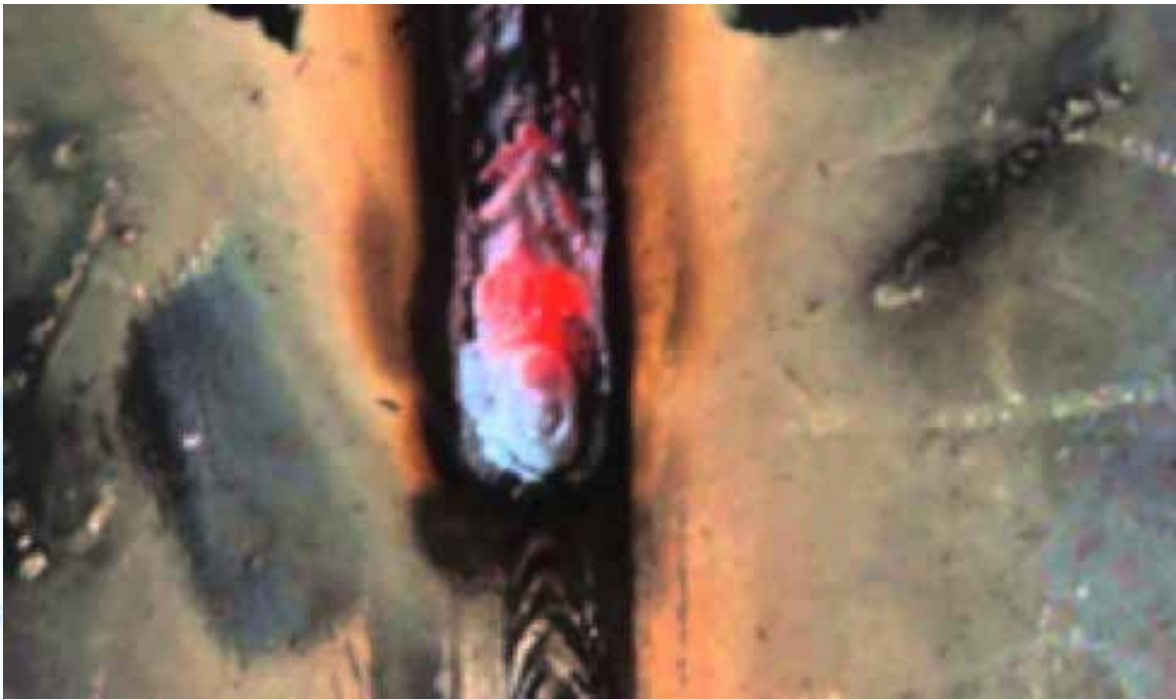


Figura 23 Estructura de la zona fundida en una soldadura con llama oxiacetilénica (500X)
Ilustración. Héctor Terán

En los bordes de soldadura durante la solidificación se produce una cristalización perpendicular a las isoterma, al igual que la solidificación en un lingote de fundición, tal como se muestra en la Figura 23.

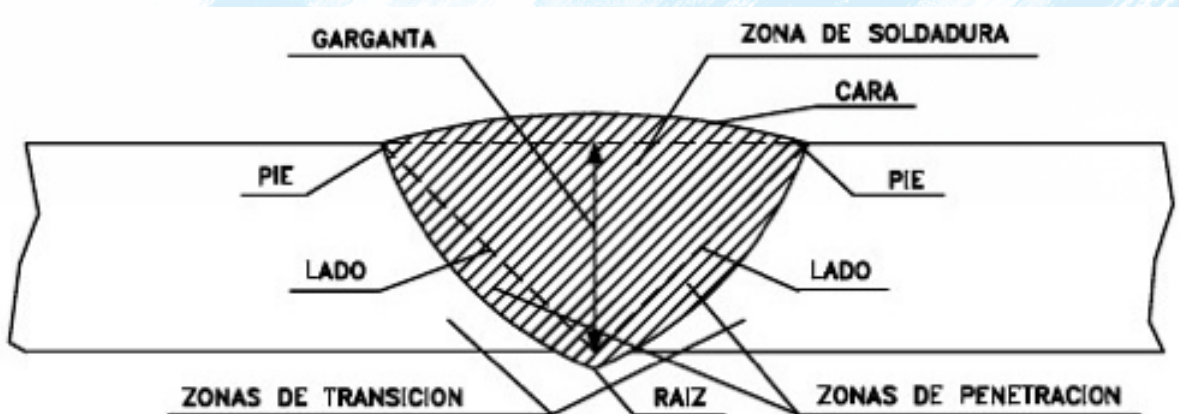


Figura 24 Estructura de los bordes de soldadura en el proceso de soldadura con flama oxiacetilénica
Ilustración. (MIKY, 2012)

En la soldadura por arco eléctrico el material de aporte se deposita en volúmenes menores que en el caso de la soldadura con llama oxiacetilénica, lo cual ocasiona la solidificación casi instantánea y, por tanto, la estructura del metal fundido es más fina, alineada y acicular (Figura 24).

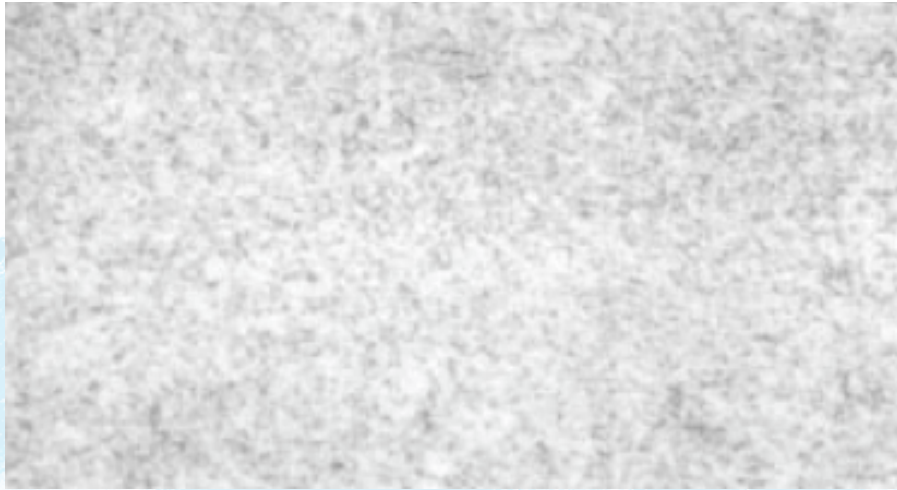


Figura 25 Estructura de la zona fundida en una soldadura por arco eléctrico (500X)
Ilustración. (Biblioteca Central 'Pedro Zulen', 1999)

Este tipo de estructura es típico de los cordones superiores de la costura en una soldadura por arco. Si la costura está constituida por varios cordones, los superiores imponen a los inferiores un ciclo térmico que ocasiona en estos un normalizado, lo cual conlleva a una estructura fina y a granos poliédricos, tal como se muestra en la Figura 25, este tipo de estructura es típica de los cordones inferiores en una costura realizada por arco eléctrico.



Figura 26 Estructura de los cordones inferiores en una costura realizada por arco eléctrico (500X)
Ilustración. (Biblioteca Central 'Pedro Zulen', 1999)

El estudio del segundo tipo de modificaciones es el que analiza las variaciones en el estado físico-químico en el material de la zona fundida y depende, para un tipo de metal determinado, del ciclo térmico impuesto durante el desarrollo del proceso de soldadura.

En la zona fundida de una soldadura con llama oxiacetilénica para un tipo de acero determinado y un espesor dado, se alcanza la temperatura de fusión y las velocidades de enfriamiento oscilan aproximadamente entre 350 y 400 °C/min, bajo esta concepción constituye la región de máximo temple, sin embargo, esta zona está sometida a una variación química, como sucede en el caso de los aceros al carbono por pérdida de elementos útiles tales como: carbono, manganeso y silicio, los cuales disminuyen la templabilidad de esta zona y frecuentemente se encuentra menos templada que las zonas adyacentes a ella. (Welding and metal fabrication, 1986)

En la soldadura por arco eléctrico la zona fundida está sometida a velocidades de enfriamiento mayores que en la soldadura con llama, con valores de hasta 1 500 a 1 600 °C/min, y la cantidad de metal fundido es más pequeña, por eso las variaciones físico - químicas que ocurren tienen mayor tendencia al temple.

ZONA DE INFLUENCIA TÉRMICA (ZIT)

La zona de influencia térmica (ZIT) es la parte del material base que no ha sido fundida, pero que producto del calentamiento o aplicación de otras formas de energía, propias de los procesos de soldadura, se producen cambios macro y micro estructurales que pueden variar las propiedades mecánicas de esta.

La distribución de la temperatura en esta zona está relacionada con la de fuente utilizada en el proceso, y siempre disminuye desde el centro de la costura hacia el material base no calentado, por esta razón en ella existe un tratamiento térmico variable de acuerdo con la distancia a que se encuentre el punto considerado del centro de la costura. Esta distribución de la temperatura en la zona de influencia térmica, depende del ciclo térmico impuesto a ella, que es función de: el proceso de soldadura, el método de soldeo, tipo y espesor del material, parámetros energéticos etc. (Metales de aporte para la soldadura, 1964)

El ciclo térmico de soldeo determina en cada punto de la zona de influencia térmica un tratamiento térmico distinto, definidos cada uno de ellos por la máxima temperatura alcanzada y la velocidad de enfriamiento, por tanto, las transformaciones que ocurren en esta zona dependen principalmente de estos dos factores.

La zona de influencia térmica se divide para su estudio en tres partes fundamentales de acuerdo con tres isoterma principales que no son más que puntos de igual temperatura en dicha zona a 700, 900 y 1100 °C. Estas zonas para los aceros son: sobrecalentamiento, recocido y la de primera transformación, tal como se muestra en la Figura 26. (Cime, 1993)



Figura27 Zona de influencia térmica.
Ilustración. Héctor Terán

La zona de sobrecalentamiento se encuentra entre la frontera del material de la costura fundido con el material base no fundido (zona de transición) y la isoterma de 1 100 °C, en esta se produce un crecimiento del grano apreciable. La **zona de recocido** se encuentra, entre la isoterma de 900 y la de 1 100°C y la **zona de la primera transformación** entre la isoterma de 900 y la de 700 °C, en esta pueden aparecer fenómenos secundarios, tales como: formación de cementita secundaria, precipitación de nitruros de hierro (Fe₄N), etc. Después de la isoterma de 700 °C, se encuentra para los aceros, el material base calentado, pero no afectado térmicamente. (Aplicación de los métodos de ensayos no destructivos al examen de las uniones soldadas.(Líquidos penetrantes), 1981)

El proceso de crecimiento de los granos en los aceros depende de dos factores: temperatura alcanzada y tiempo de permanencia a esta temperatura. (Proyecto de recomendaciones prácticas para el exámen de rayos x de uniones soldadas por fusión en aluminio y sus aleaciones y magnesio y sus aleaciones en espesores inferiores a 50mm, 1968)

El calentamiento de un acero hasta la temperatura Ac_3 no origina un aumento en el tamaño de los granos del mismo, sino es necesario un cierto grado de sobrecalentamiento, es decir alcanzar la temperatura T_i , tal como se observa en la Figura 27, para lograr que los granos del metal comiencen a aumentar de tamaño, obteniéndose a esta temperatura determinada cantidad de granos finos en la estructura. Con el posterior aumento de la temperatura, los granos gruesos absorben a los pequeños y es en la temperatura T_s a la cual se tiene el 100 % de los granos gruesos, esta temperatura es la que define la temperatura en la zona de sobrecalentamiento.

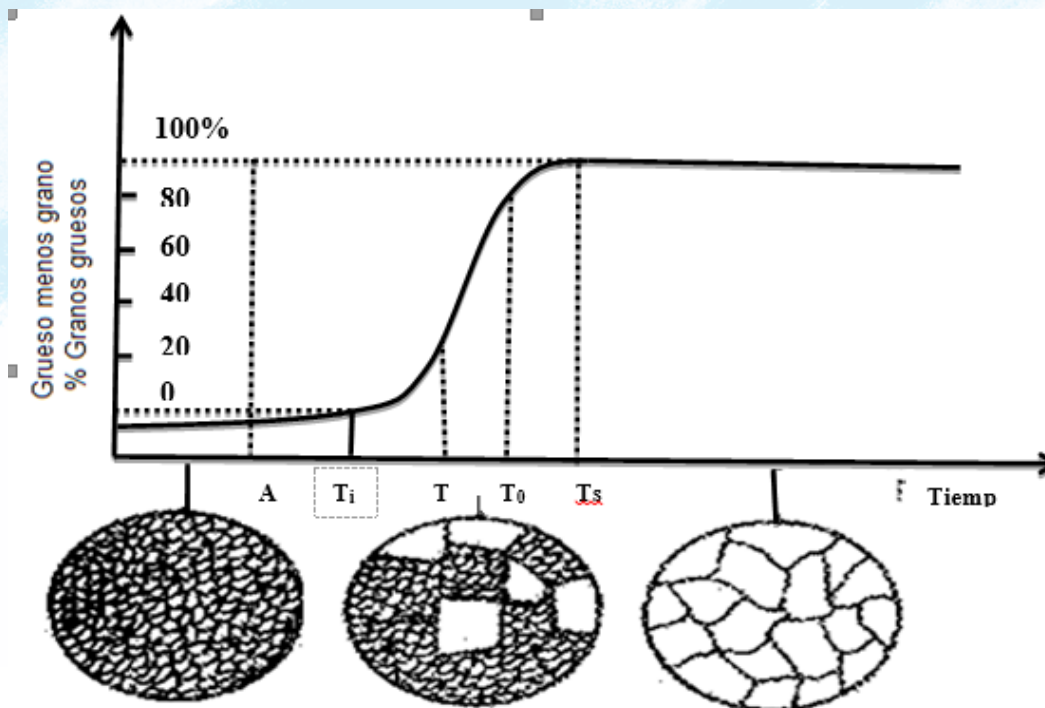


Figura 28 Influencia de la temperatura en el crecimiento de los granos Ilustración. (Baño fundido y continuidad en la soldadura y el metal base)

El otro factor determinante en el crecimiento de los granos de los aceros es el tiempo de permanencia a una temperatura determinada, el cual conjuntamente con el anterior se ilustra en la Figura 28. En esta se pueden

observar las siguientes cuestiones: a la temperatura de 1 200 °C, el crecimiento total de los granos se alcanza en 8 h, a medida que aumenta el tiempo de permanencia a una temperatura determinada, la cantidad y el tamaño del grano aumentan; para un mismo tiempo de permanencia la cantidad y el tamaño del grano aumentan a medida que aumenta la temperatura a que está sometido el acero; a temperaturas inferiores de 1 200 °C no se alcanza que el 100 % de los granos aumenten de tamaño, independientemente del tiempo de permanencia.

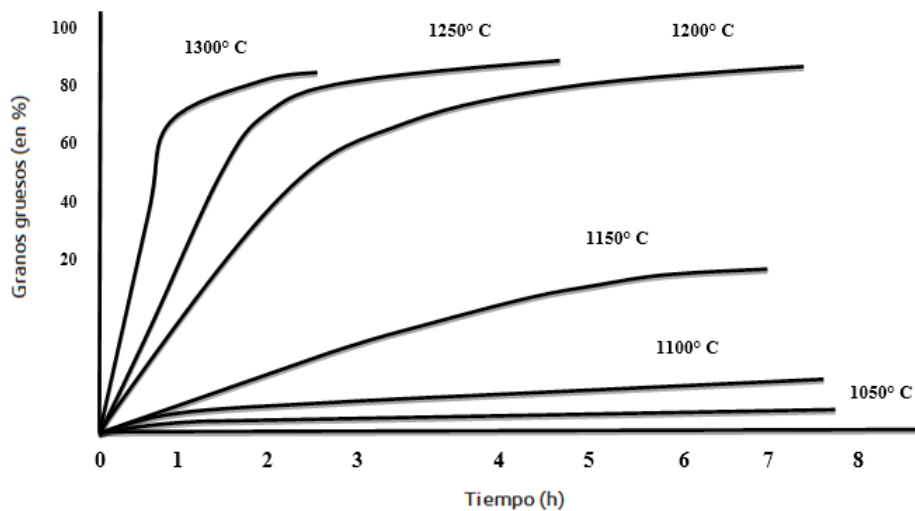


Figura 29 Influencia de la temperatura y el tiempo de permanencia en el crecimiento de los granos.
Ilustración. Héctor Terán

El estudio de la zona de influencia térmica tiene un carácter esencial sobre todo en la soldadura de aceros sensibles al temple, donde producto de los ciclos térmicos impuestos a las uniones soldadas se desarrollan estructuras de alta dureza y fragilidad, que ocasionan muchas veces agrietamiento en las mismas.

Generalmente las modificaciones estructurales de la zona de influencia térmica en los aceros se deben a: modificaciones que afectan la estructura del grano y modificaciones en el estado físico químico del metal.

En otros tipos de metales o aleaciones particulares se observan fenómenos de precipitación de compuestos tales como: los carburos de cromo en los aceros inoxidable austeníticos o precipitados tales como el Mg_2Si y el $CuAl_2$ en las aleaciones de aluminio.

Modificaciones que afectan la estructura del grano

El tamaño del grano depende del ciclo térmico impuesto en cada proceso de soldadura, debido a que éste determinará la temperatura y el tiempo de permanencia.

El proceso de soldadura con llama oxiacetilénica, a diferencia de los procesos de soldadura por arco eléctrico, tiene las siguientes particularidades: la fuente de calor es de menor temperatura, la velocidad de desplazamiento de la fuente es pequeña y los volúmenes de metal fundido son mayores. Estas particularidades anteriores precisan que el proceso de soldadura con llama sea más lento y paulatino, que los procesos de soldadura por arco, y, que, por lo tanto, los tiempos de permanencia a altas temperaturas sean mayores. En la Figura 29 se muestra la variación del tamaño del grano a lo largo de una unión soldada en los dos procesos anteriores, en ella se representa en el eje de las abscisas la distancia desde el centro de la costura hacia la zona de influencia térmica, pero por la línea central de la sección representada, o sea, a la mitad del espesor del material base y en el eje de las ordenadas, la relación entre la superficie media de los granos en un punto dado " S " y la superficie inicial del grano en estado recocido " S_0 " (S'/S_0).

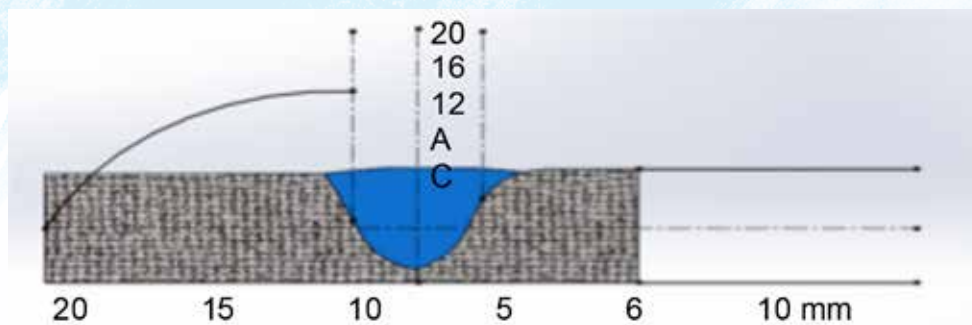


Figura 9 Influencia del ciclo térmico en el tamaño del grano de la zona de influencia térmica
Ilustración. Héctor Terán

En la zona de sobrecalentamiento de una unión soldada realizada por el proceso de soldadura con llama oxiacetilénica, la relación S'/S_0 sobrepasa el valor de 16 y a medida que la distancia en el eje de las abscisas aumenta, este valor disminuye paulatinamente hasta el valor del tamaño del grano en estado recocido, esta forma de variación del tamaño del grano es propio de las características del proceso.

En los procesos de soldadura por arco eléctrico los granos que se encuentran en la zona de unión con la zona fundida son pequeños, producto del efecto de normalizado que producen los cordones en la soldadura por arco eléctrico, alcanzando la relación S'/S_0 un valor máximo de 2, pero en una zona pequeña y muy cercana, esta relación alcanza un valor mayor de 12, debido a que el efecto de normalizado no llega a dicha zona, disminuyendo más tarde este valor hasta el del material base en estado recocido.

Modificaciones en el estado físico-químico del material.

La zona de influencia térmica está sometida a un tratamiento térmico variable de acuerdo con el punto considerado en la misma, por lo tanto, para un acero determinado el ciclo térmico impuesto ocasiona modificaciones en el estado físico-químico del acero en cuestión.

Los procesos de soldadura con llama oxiacetilénica y los de arco eléctrico tienen diferencias en sus características esenciales, esto ocasiona modificaciones en el estado físico-químico de los diferentes aceros existentes.

Soldadura con llama oxiacetilénica.

El ciclo térmico impuesto está condicionado directamente por el espesor del material a soldar, por esta razón para realizar un análisis determinado se fija un espesor de plancha de 10 mm en un acero específico.

La zona de sobrecalentamiento, la cual se encuentra entre la isoterma de 1 100°C y la frontera entre la zona fundida con el material base no fundido está sometida a velocidades de enfriamiento relativamente grandes de 200 a 300 °C/min, en ella se presenta un tamaño de grano grueso y una transformación estructural con tendencia al temple, según el tipo de acero en cuestión. En esta zona la influencia en las modificaciones químicas del metal no se presenta y, por lo tanto, en la estructura final de la misma sólo interviene el ciclo térmico impuesto a ésta.

La zona de recocido se encuentra entre las isotermas de 900 y 1 100 °C, y está sometida a velocidades de enfriamiento entre 170 y 200 °C/min, en esta zona el metal tiene tendencia hacia una estructura normalizada con granos finos, pero sólo parcialmente, debido a que las velocidades de enfriamiento se consideran altas.

La zona de la primera transformación se encuentra entre las isoterms de 700 y 900 °C y está sometida a velocidades de enfriamiento de hasta 100 °C/min. En esta zona las modificaciones pueden presentar aspectos diferentes, en particular, puede existir globalización del agregado laminar con tendencia a la coalescencia sin modificación sensible del grano de ferrita. Esta zona puede encontrarse hasta una distancia de 20 a 25 mm del eje de la costura, en una plancha de 10 mm de espesor.

Después de esta zona se encuentra el material base calentado, pero sin sufrir ninguna alteración, si inicialmente se encontraba en estado recocido, si por el contrario la pieza ha sido sometida a tratamientos térmicos preliminares tales como: temple, recocido, etc.; las transformaciones en la zona de sobrecalentamiento y de recocido no varían de lo anteriormente expresado, pero en la zona de la primera transformación y en el material base no afectado se producen nuevas transformaciones.

Soldadura por arco eléctrico

En estos procesos todas las zonas anteriormente descritas, se encuentran agrupadas en una sección muy pequeña de material, de una distancia que varía entre los 4 a 5 mm del borde de la zona fundida, independientemente del espesor de la plancha. Esto se debe a la característica que tienen los procesos de soldadura por arco eléctrico, los cuales se efectúan en pequeños cordones que actúan sobre la estructura de la zona de influencia térmica obteniéndose zonas afectadas y zonas parcialmente normalizadas.

Las estructuras se encuentran distribuidas en un volumen muy reducido y son muy complejas, debido a la superposición de varios tratamientos térmicos, tal como se observa en la Figura 31.

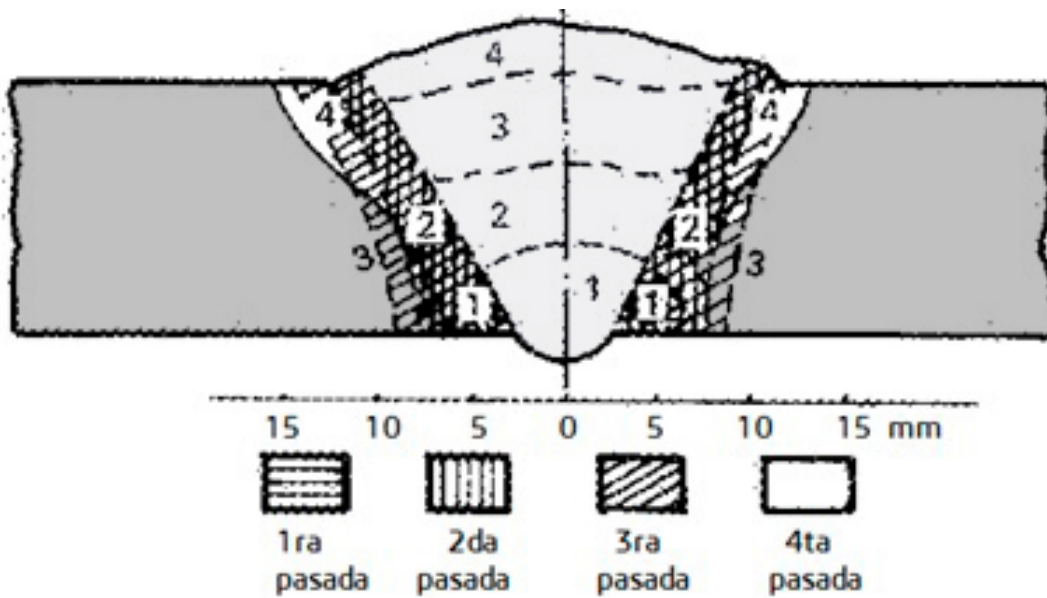


Figura 31 Efecto del ciclo térmico en varios cordones sobre la zona de influencia térmica.
Ilustración. Héctor Terán

La superposición de cordones modifica la estructura en la zona de sobrecalentamiento y, por lo tanto, las propiedades mecánicas, tal como se observa en la Figura 32.

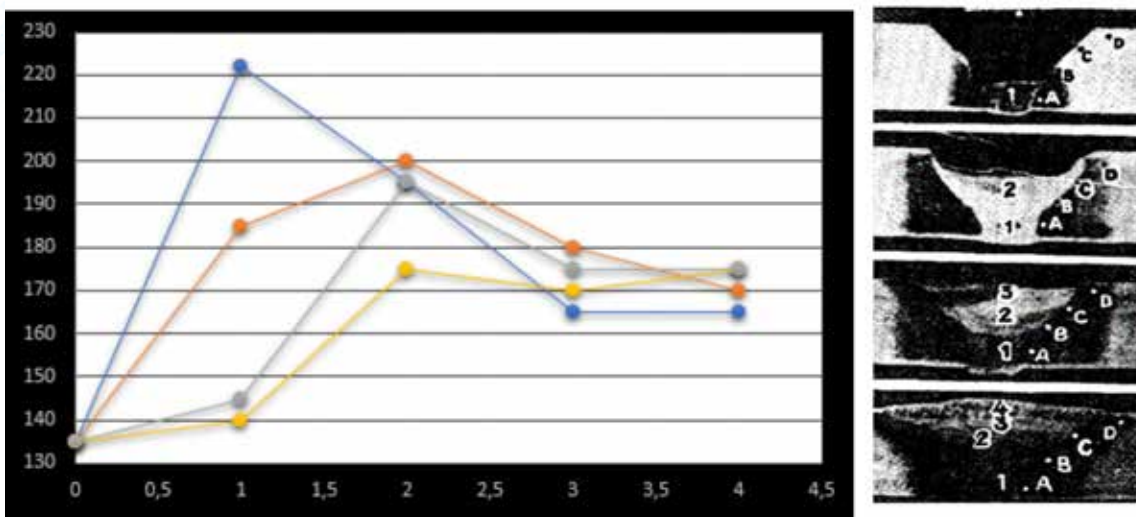

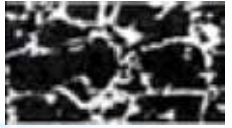

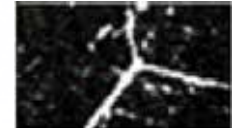





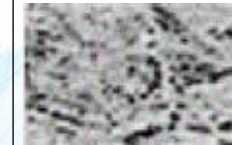





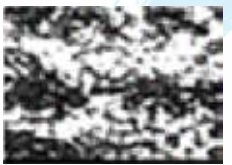

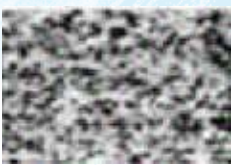

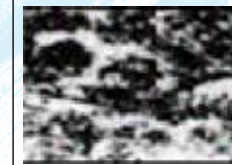


Figura 32 Influencia de los cordones superiores sobre la variación de la dureza en la zona de sobrecalentamiento.
Ilustración: Héctor Terán.

Tabla 2 Tipos de Granos

Tabla 3 Estructura

Composición Química	Metal base	Zona Primera	Zona recocida	Zona sobrecalentamiento	Zona Fundida
C=0,41% Mn=95% S=0,96%					
H	140Br x100	160 x100	170 x100	185 x100	160 x100
C=0,20% Mn=1,75% S=0,28% Cr=0,33%					
H	190Br x100	200 x125	220 x125	2440 x125	230 x125
C=0,27% Mn=1,1% Cr=0,85% V=0,12%					
H	105Br x125	190 x125	260,230 x125	280 x125	220 x125
C=0,22% N=4,335% Cr=1,21%					
H	195Br x1000	460 x125	435 x125	510 x125	350 x125

1	Estructura de recocido: Ferrita y perlita	Aumento tamaño grano red ferita con fino agregado perlítico	Granos gruesos de la red ferrita con agregado tipo troostítico	Estructura muy basta de ferrita con agregado troostítico fino	Estructura de Windmenstaett en
2	Estructura Fina y homogénea de ferrita y perlita	Tendencia a la granulacion de la perlita. La estructura sigue siendo heterogénea	Precipitación de ferrita sobresturada estructura precedente de la formación	Ferrita acicular Estructura bainítica	Estructura de Windmenstaett en
3	Ferrita y perlita estructura en bandas heterogéneas	Tendencia a la granulacion de la perlita. La estructura sigue siendo heterogénea	Precipitación de ferrita acicular sobre fondo de un agregado fino	Estructura que depende de la transformación a Bainita inferior	Ferrita acicular Bainita superior
4	Ferrita y perlita en coalescencia estructura de recocida	Transformación A Martesita fina	Estructura que depende de la transformación a martesita fina	Martesita basta	Transformación A Estructura acicular de bainita inferior

Elaborado por: Héctor Téran

En la misma se ilustra el efecto del recocido por la variación de la dureza en puntos diferentes de la zona de sobrecalentamiento tales como: A, B, C y D, se nota que en la primera pasada el punto A adquiere un aumento notable de la dureza, el cual llega a alcanzar el 65 % de la dureza inicial del material base, pero luego disminuye después de la tercera pasada, igual ocurre con el resto de los puntos de esta zona. Al final se tiene una homogeneización de las propiedades mecánicas y estructurales, exceptuando en algunas ocasiones la zona superior entre la costura y la zona de transición. En los gráficos 2.13, 2.14 y 2.15 se muestran los diferentes tipos de estructuras y durezas obtenidas en aceros al carbono diferentes, en los procesos de soldadura con llama oxiacetilénica y arco eléctrico.

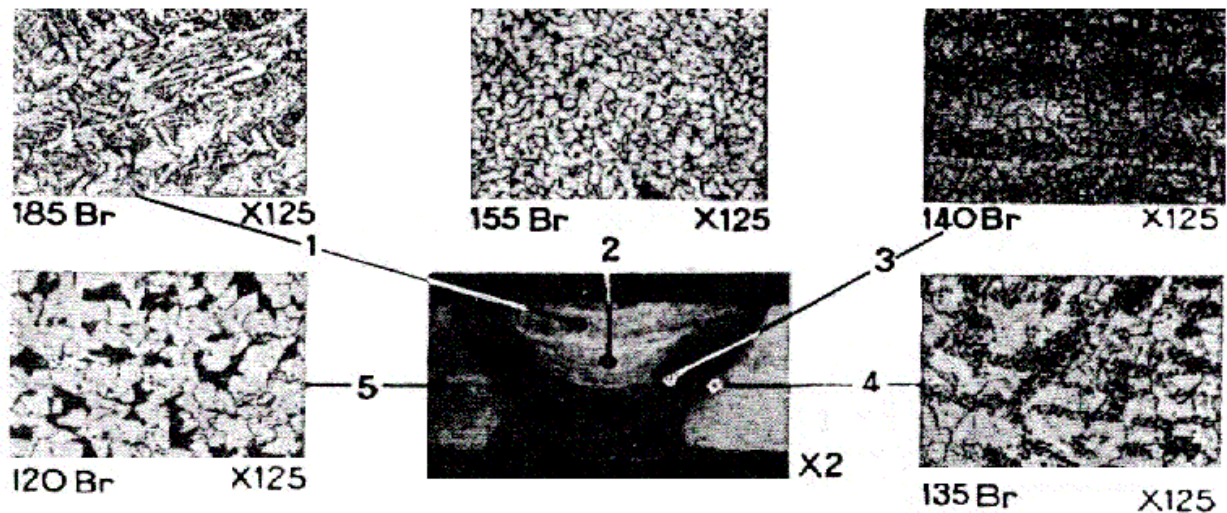


Figura 33 Estructura y dureza en la soldadura por arco eléctrico en un acero de bajo contenido de carbono en planchas de 10mm de espesor, con electrodo básico de 50 kg/mm² de resistencia
Ilustración. Héctor Terán

Composición química del material base.

C = 0,13 %; Mn = 0,49 %; Si = indicios, S = 0,023 %; P = 0,018% y N₂ = 0,003 %.

Composición química de la zona fundida.

C = 0,08 %; Mn = 0,68 %; Si = 0,42 %; S = 0,012 %; P = 0,015% y N₂ = 0,012 %.

El ataque macrográfico muestra:

1. La estructura de la zona fundida es orientada en el tercer cordón.
2. La zona de transformación en la zona de influencia térmica ha sufrido poca influencia del ciclo térmico impuesto por los cordones de soldadura.
3. Esta zona ha sido coloreada por los ataques.
4. El cordón de la raíz ejecutado por el lado posterior muestra una estructura orientada.

El análisis de las microestructuras es el siguiente:

1. Estructura basáltica en el último cordón.
2. Estructura "normalizada" del centro de la zona fundida, ferrita muy fina.
3. Estructura granular afinada en el centro de la zona de transformación.
4. Estructura en coalescencia de la perlita al final de la zona de transformación A_1-A_3 .
5. Estructura homogénea de ferrita y perlita en el material base no afectado.

Composición química del material base

C = 0,33 %; Mn = 0,54 %; Si = 0,02 %; S = 0,018 %;
P = 0,025 % y N₂ = 0,007%.

Composición química de la zona fundida

C = 0,01 %; Mn = 0,65 %; Si = 0,37 %; S = 0,013 %;
P = 0,02 % y N₂ = 0,01 %.

En el ataque macrográfico muestra:

Gran número de cordones en la unión soldada. La influencia de los cordones sobre la zona de transformación del material base se manifiesta por las zonas coloreadas y no coloreadas en forma alterna, en la que las últimas indican una tendencia a la normalización de la estructura.

El análisis de las microestructuras es el siguiente:

1. Zona de transición entre la zona fundida y la zona de influencia térmica. Estructura basta de la zona de sobrecalentamiento con un agregado fino probablemente troostítico.

2. Estructura basáltica del cordón superior de la zona fundida. El centro de la zona fundida presenta una estructura afinada de ferrita como la microestructura 2 del gráfico 2.2.
3. Estructura fina regenerada de ferrita y perlita en el centro de la zona de transformación.
4. Estructura fina y con coalescencia en el final de la zona de transformación A_1-A_3 .
5. Estructura de ferrita y perlita en el material base no afectado.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMA Y DIMENSIONES DE LA ZONA DE INFLUENCIA TÉRMICA.

La forma y dimensiones de la zona de influencia térmica dependen de varios factores, los principales son: naturaleza y espesor del material base a soldar, proceso de soldadura utilizado, intensidad de corriente eléctrica, velocidad de soldadura y uniformidad de la misma, método de soldeo, tamaño de la boquilla, etc.

Los metales que tienen menor conductividad térmica tienen una zona de influencia térmica de mayor tamaño, debido a que retienen el calor durante un tiempo más grande, sin embargo, al aumentar el espesor de la plancha la zona de influencia térmica alcanza un valor menor, debido a que el volumen del material alrededor del punto es mayor y, por lo tanto, la conducción del calor es más grande.

En el proceso de soldadura con llama oxiacetilénica la zona de influencia térmica es mayor que en los procesos de soldadura por arco, debido a que la fuente de calor en la soldadura con llama está menos concentrada y que los volúmenes de metal que se depositan son mayores.

El aumento de la intensidad de la corriente provoca un crecimiento de la zona de influencia térmica, por ejemplo, en la soldadura automática bajo fundente con intensidades de corriente entre 2 000 y 2 500 A, y velocidades de 10 a 12 m/h, se alcanza un ancho de la zona de influencia térmica de 8 a 10 mm en un acero de 40 mm de espesor, pero en un acero de 2 mm de espesor con 1 200-1 400 A y velocidad de 360 m/h se alcanzan valores de 0,5 a 0,7 mm.

Al aumentar la velocidad de soldadura se disminuye el ancho de la zona de influencia térmica, debido a que se disminuye la energía térmica por

unidad de longitud; la uniformidad de la velocidad de soldadura determina en un mayor o menor grado el ancho de esta zona.

En planchas gruesas la zona de influencia térmica es más estrecha cuando se suelda con el método a derechas en comparación con el de izquierdas, sin embargo, en planchas delgadas el método a derechas produce una zona de influencia térmica más ancha.

La zona de influencia térmica tendrá un ancho menor cuando se seleccione el tamaño de boquilla adecuado.

ESTRUCTURA DE WIDMANSTAETTEN

La estructura objeto de estudio fue observada por primera vez por A. D. Widmanstaetten y tiene la particularidad de tener gran fragilidad con agujas que siguen tres o cuatro direcciones principales. Esta estructura se puede presentar generalmente en la zona fundida, aunque también en la zona de influencia térmica o en piezas de gran masa sometidas a oxicorte.

Las uniones soldadas que presentan este tipo de estructura tienen propiedades mecánicas con valores menores que los normales y en especial una resistencia a la viscosidad de impacto muy pequeña.

La aparición de esta estructura en las uniones soldadas depende de tres factores fundamentales, que son: composición química del acero, tamaño del grano de austenita que va a dar origen a la estructura y velocidad de enfriamiento desde la fase austenítica.

Los aceros que pueden presentar este tipo de estructura son los que tienen contenido de carbono entre 0,2 y 0,4 %, para grados de sobrecalentamiento pequeños o aceros con contenidos de carbono menores para grados de sobrecalentamiento mayores.

A una misma velocidad de enfriamiento dada se puede obtener o no la estructura de Widmanstaetten, dependiendo del tamaño de grano de austenita, o sea del sobrecalentamiento.

El proceso de soldadura oxiacetilénica tiene más susceptibilidad para obtener la estructura estudiada que el de soldadura por arco, esto se debe a la forma en que en este proceso se transfiere el calor.

La estructura de Widmanstaetten se puede presentar total o parcialmente en la pieza, ya sea si se dan todas las condiciones, o si falta alguna de éstas, tal como se observa en las Figuras. 33 y 34.

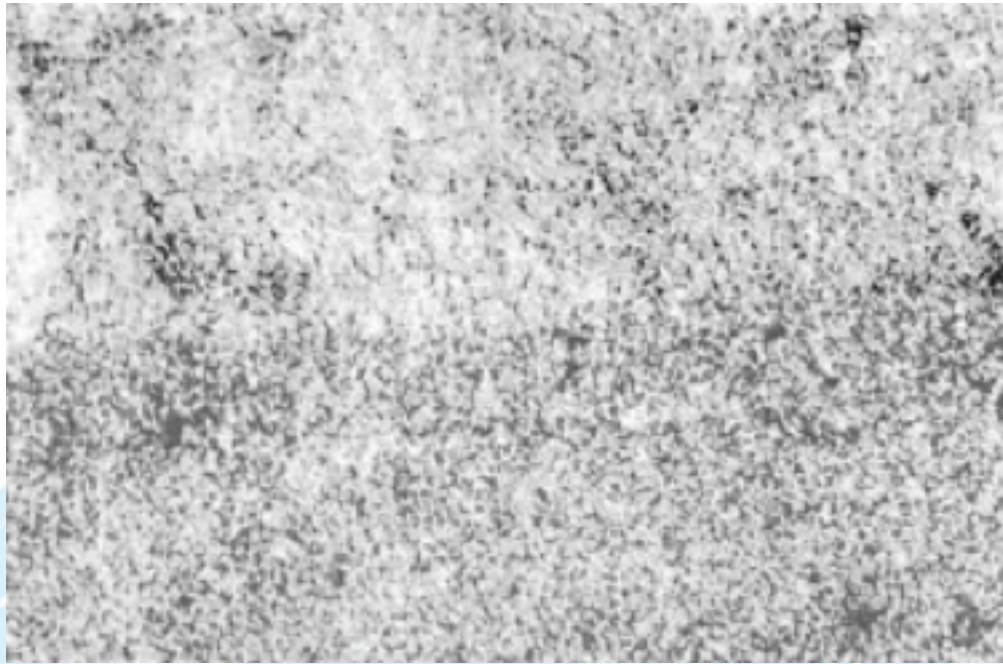


Figura 34 Estructura de Widmanstaetten incompleta en soldadura con llama oxiacetilénica (X100).
Ilustración. (Biblioteca Central 'Pedro Zulen', 1999)

La naturaleza del agregado situado paralelamente a los planos de deslizamientos puede ser perlita o troostita y algunas propiedades dependen específicamente de éste, tales como, por ejemplo, la dureza.

Elementos tales como el manganeso, cromo y molibdeno tienden a favorecer la formación de la estructura de Widmanstaetten.



CAPÍTULO 3

Soldabilidad de los Metales

INTRODUCCIÓN

En el tema en cuestión se estudia el concepto de soldabilidad desde un punto de vista general, abarcando sus tres aspectos fundamentales que son: metalúrgico, operatorio y constructivo.

Se analizan los factores que afectan la soldabilidad de un material, entre los cuales se encuentran: proceso de soldadura, naturaleza del material base antes de la ejecución del proceso, influencia de los elementos aleantes, tecnología y secuencia de soldadura, velocidad de enfriamiento, energía suministrada y temperatura de precalentamiento, espesor del material base y tipo de unión soldada, características térmicas del material base y transformaciones estructurales. Al final del capítulo se estudia soldabilidad de los materiales y la clasificación de los aceros de acuerdo al grado de soldabilidad.

SOLDABILIDAD. DIVERSOS ASPECTOS DE LA SOLDABILIDAD

El término de “soldabilidad” puede ser definido de forma general como la reacción del material al efecto del proceso de soldadura en cuestión. De una manera más amplia como la capacidad de los materiales para ser soldados manteniendo sus -propiedades físico - químicas y estructurales.

En general es la capacidad que tienen los materiales de la misma o de diferente naturaleza, para ser unidos de forma indesarmable mediante los procesos de soldadura sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar alabeos o agrietamientos en el material en cuestión u otros problemas concernientes al punto de fusión de estos o de sus óxidos, defectos, etc.

La soldabilidad de un material constituye una propiedad del mismo muy compleja y en muchas ocasiones queda condicionada a variaciones metalúrgicas o a propiedades de estos. Esto significa que un material tendrá buena soldabilidad, cuando se pueda lograr una unión soldada con propiedades mecánicas y fisicoquímicas adecuadas, por cualquiera de los procesos de soldadura existentes y sin la necesidad de utilizar técnicas auxiliares.

La soldabilidad de un material encierra tres aspectos esenciales bajo los cuales queda dividida su definición, estos son: metalúrgicos, operatorios y constructivos.

La **soldabilidad metalúrgica** es la capacidad que tienen los materiales de la misma o de diferente naturaleza, para ser unidos de forma indeseable mediante los procesos de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales en la unión soldada o variaciones en las propiedades químicas de esta, que ocasionen cambios en las propiedades mecánicas o químicas del material, tal como ocurre en el primer caso, en los aceros aleados donde existe la posibilidad de formarse estructuras de martensita y en el segundo caso como sucede en los aceros inoxidable austeníticos al cromo níquel, que al precipitarse los carburos de cromo disminuye su resistencia a la corrosión.

La **soldabilidad operatoria** responde en sí, a la operación de soldadura, en lo que respecta a las cuestiones tecnológicas de ejecución de las uniones soldadas por cualquier proceso de soldadura, ya sea por fusión, con calor y presión, y solo por presión; por ejemplo, si un metal o su óxido tienen una temperatura muy alta con respecto a los procesos de soldadura con llama oxiacetilénica o arco eléctrico, no se podrá obtener una unión soldada continua y, por lo tanto, tendrá una soldabilidad operatoria regular tal es el caso del aluminio y sus aleaciones o el de los aceros aleados al cromo que forman los óxidos de aluminio (Al_2O_3) y de cromo que dificultan la obtención de una unión soldada adecuada. La soldabilidad operatoria regular de estos materiales se mejora con la utilización de fundentes o revestimientos que disuelven estos óxidos, por lo cual queda en estos casos condicionada la soldabilidad de estos materiales a éste recurso tecnológico.

La **soldabilidad constructiva** concierne a propiedades físicas del material, tales como las de dilatación y contracción, que provocan tensiones o deformaciones, las cuales pueden originar el agrietamiento de la unión soldada, como por ejemplo sucede en los hierros fundidos que por su poca plasticidad no tienen la capacidad de absorber deformaciones y hay que recurrir también a recursos tecnológicos para evitar esta soldabilidad condicionada.

Se considera que un material tiene buena soldabilidad cuando cumple con los tres aspectos anteriores y soldabilidad regular o condicionada, cuando no cumple alguno de ellos, pero que por medio de soluciones tecnológicas se puede obtener una unión soldada de calidad. Un material tendrá mala soldabilidad cuando los problemas o aspectos anteriormente citados no se

pueden resolver para la obtención de una unión indesarmable con buenas propiedades mecánicas y químicas.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SOLDABILIDAD

El concepto de soldabilidad analizado integralmente se enfoca hacia la obtención de una unión soldada que pueda cumplir los requisitos técnicos para lo cual ella está diseñada y sobre este concepto influyen toda una serie de factores tales como: procesos de soldadura, naturaleza del material base antes de la ejecución del proceso, influencia de los elementos aleantes, tecnología y secuencia de soldadura, velocidad de enfriamiento, energía o calor suministrado (heat input) y temperatura de precalentamiento, espesor del material base y tipo de unión soldada, características térmicas del material base, etcétera. Estos factores son los que fundamentan los pasos tecnológicos que sirven para solucionar problemas de soldadura.

a) Proceso de soldadura

El proceso de soldadura entre materiales iguales o diferentes tiene una influencia determinante en la soldabilidad de los mismos. Se conoce la diferencia existente en el tamaño, forma y orientación de los granos, entre los procesos de soldadura con llama oxiacetilénica y arco eléctrico, y el efecto que esto produce sobre la soldabilidad de los metales. La variación de factores tales como: proceso de soldadura, polaridad de la corriente, gas protector, diámetro del electrodo o varilla, etc., tienen una influencia determinante en las características anteriormente expuestas sobre el grano del metal.

Los diferentes procesos de soldadura tienen una influencia marcada sobre el coeficiente de dilución de la unión soldada, el cual afecta de una u otra forma la soldabilidad de los metales, sobre todo en algunos casos, cuando se suelda con un material de aporte de diferente composición química que el material base. En algunos procesos de soldadura este coeficiente puede ser elevado tal como sucede en los procesos de soldadura automática bajo fundente, soldadura por ultrasonido, etc., pero en otros puede tener valores menores en función de factores tecnológicos que gobiernan el ciclo térmico impuesto a la unión soldada.

b) Naturaleza del material base antes de la ejecución del proceso

La naturaleza del material base antes de la ejecución del proceso de soldadura puede tener una influencia marcada en la soldabilidad de los materiales. El estado de la superficie del metal y las propiedades mecánicas y químicas tienen un efecto decisivo en la obtención de una buena unión soldada.

En la superficie del material base antes de ser soldado, existe la posibilidad de que se encuentre determinada cantidad de humedad, la cual puede ser la causante de la adición de hidrógeno en la zona fundida y ocasionar los poros o el agrietamiento debido al hidrógeno. Otros elementos que contaminan la superficie del material y afectan la soldabilidad, son el azufre y el plomo, los cuales tienen tendencia a la formación de constituyentes de bajo punto de fusión. Los óxidos como la herrumbre y las costras sobre materiales ferrosos, pueden afectar la fusión durante el desarrollo del proceso, otros óxidos de titanio o aluminio, los cuales tienen un elevado punto de fusión, pueden también evitar una fusión adecuada.

Los materiales que se endurecen por envejecimiento con precipitados muy estables se sueldan con el mínimo desarrollo de calor, en estos materiales es posible el surgimiento de una pequeña área con baja dureza en la zona de influencia térmica. Los materiales que se endurecen por envejecimiento a baja temperatura y tienen precipitados menos estables, tienen la particularidad de presentar un sobre envejecimiento en la zona de influencia térmica, cuando la cantidad de calor impuesto a la unión soldada es elevada.

La composición química del material base tiene una influencia determinante en la soldabilidad de los materiales, quizás sea éste uno de los factores más importantes al respecto, ya que, por ejemplo, no es lo mismo soldar un acero de bajo contenido de carbono que uno de elevado contenido de éste, donde con el aumento del contenido de carbono se aumenta la templabilidad y se disminuye la soldabilidad.

La relación de carbono - silicio y cromo - níquel, tiene una influencia importante en la soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos, debido a que estos favorecen el agrietamiento en caliente de estos aceros.

c) Influencia de los elementos aleantes

Los elementos aleantes que se añaden intencionalmente, durante los procesos de soldadura influyen en las características mecánicas y metalúrgicas

de la zona fundida y de la zona de influencia térmica. Estos elementos se adicionan por una o varias de las siguientes causas: formación de soluciones sólidas intersticiales y aumento de las propiedades mecánicas, formación de aleaciones sustitucionales, favorecer la desoxidación del metal fundido sin la pérdida de elementos aleantes iniciales, aumento o disminución de la dureza en la zona de influencia térmica, formación de precipitados que endurecen por envejecimiento, formación de carburos, favorecer el control del aumento del tamaño del grano, reducir las segregaciones, aumento o disminución de la temperatura de transformación del estado dúctil al frágil, controlar la cantidad, distribución y forma de las inclusiones.

Los elementos aleantes capaces de formar soluciones sólidas intersticiales son el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, y boro, la presencia de pequeñas cantidades de estos elementos es suficiente para lograr un aumento en las propiedades mecánicas del mismo, un ejemplo de esto lo constituye el carbono y el boro, los cuales aumentan la dureza en los aceros.

Las soluciones sólidas sustitucionales se forman cuando se añade un elemento por sustitución, entonces el cristal original se deforma en relación lineal a la cantidad de este elemento aleante, la dureza y la resistencia mecánica aumentan linealmente con la cantidad del elemento añadido. Cuando el elemento aleante sobrepasa el límite de solubilidad en el estado sólido, se presentan problemas que afectan la soldabilidad, tales como la formación de fases secundarias, compuestos intermetálicos, etcétera. La resistencia a la corrosión de estos materiales disminuye cuando se forman fases intermetálicas o fases secundarias. Se conoce la influencia que tienen los óxidos en las propiedades mecánicas de los aceros durante el desarrollo de los procesos de soldadura, por esta razón es necesario añadir elementos aleantes con mayor afinidad por el oxígeno que el hierro tales como: Ti, Al, Zr, V, Si, etc., que actúan como agentes desoxidantes en los aceros al carbono y bajo aleados. En las aleaciones a base de cobre se utilizan como agentes desoxidantes el Al, Zn, Si, Zr y P. En general todos los procesos de soldadura por fusión necesitan agentes desoxidantes a menos que se realicen al vacío o en atmósferas especiales.

Algunos elementos aleantes tales como: C, Mn, Mo, Cr, V, Ni y Si, aumentan la dureza en los aceros, debido a la disminución de la razón de enfriamiento y de la temperatura de transformación de la austenita

a martensita. Este aumento de la dureza de los aceros al carbono y bajo aleados afecta la soldabilidad de los mismos, producto de la gran tendencia al agrietamiento que acompaña este fenómeno. La dureza también puede aumentar debido a la formación de precipitados por envejecimiento y por la formación de carburos.

La adición de elementos aleantes como refinadores del grano, tienen la función principal de evitar la formación de granos gruesos con las pobres propiedades mecánicas que estos ocasionan.

El Al, V, Ti, Zr y N, actúan como refinadores de grano en los aceros al carbono y bajo aleados, el Zr y Ti en las aleaciones de aluminio y el Fe, Al y Ti, son utilizados en las aleaciones de cobre.

d) Tecnología y secuencia de soldadura

La selección de la secuencia y tecnología de soldadura más adecuada, depende de las características del material base y del servicio que posteriormente este necesite realizar.

La tecnología y secuencia de soldadura en cada caso están encaminadas a eliminar los problemas que afectan a la soldabilidad del material en cuestión, ya que solamente se hace necesario y económico aplicar tecnologías especiales de soldadura, cuando se presentan problemas específicos en la soldabilidad del material, esto puede ocurrir cuando la composición química del material no sea totalmente satisfactoria, cuando las propiedades físicas o estructurales del material base, del material de aporte o ambas, son diferentes o cuando las tensiones residuales que se obtienen son altas.

Una tecnología y secuencia de soldadura correctas pueden disminuir o eliminar deformaciones, agrietamientos del material base y la costura, porosidad, etc. La utilización de pasadas o cordones anchos pueden evitar el agrietamiento durante el enfriamiento.

Las secuencias o métodos de soldadura “hacia atrás” en forma de “cascada”, etc., disminuyen el calor impuesto a la costura y, por lo tanto, reducen la contracción. Siempre que sea posible se aconseja que la dirección de los cordones o pasadas sean hacia el lado libre de la unión, para garantizar la libre dilatación de esta y evitar así el peligro del agrietamiento.

El calentamiento posterior (post heating) al proceso de soldadura debe aplicarse inmediatamente después de realizar la unión soldada, sobre todo

en los aceros al carbono y bajo aleados, con el objetivo de disminuir el enfriamiento y el agrietamiento, aunque este calentamiento puede evitar la formación de las grietas él no las elimina una vez de estar formadas.

e) Velocidad de enfriamiento

La cantidad de calor cedido al material base, el precalentamiento (pre heating) en caso de utilizarse y el tipo de proceso empleado, determinan la velocidad de enfriamiento de la zona fundida y de la zona de influencia térmica.

f) Energía suministrada y temperatura de precalentamiento.

La cantidad de calor impuesto a las uniones soldadas en el desarrollo de los procesos de soldadura se denomina “energía suministrada” y “temperatura de precalentamiento”, es aquella que alcanza el material base por la aplicación de energía en forma de calor un pequeño tiempo antes de ejecutar los procesos de soldadura; ambos factores tienen un efecto significativo en la soldabilidad de los metales.

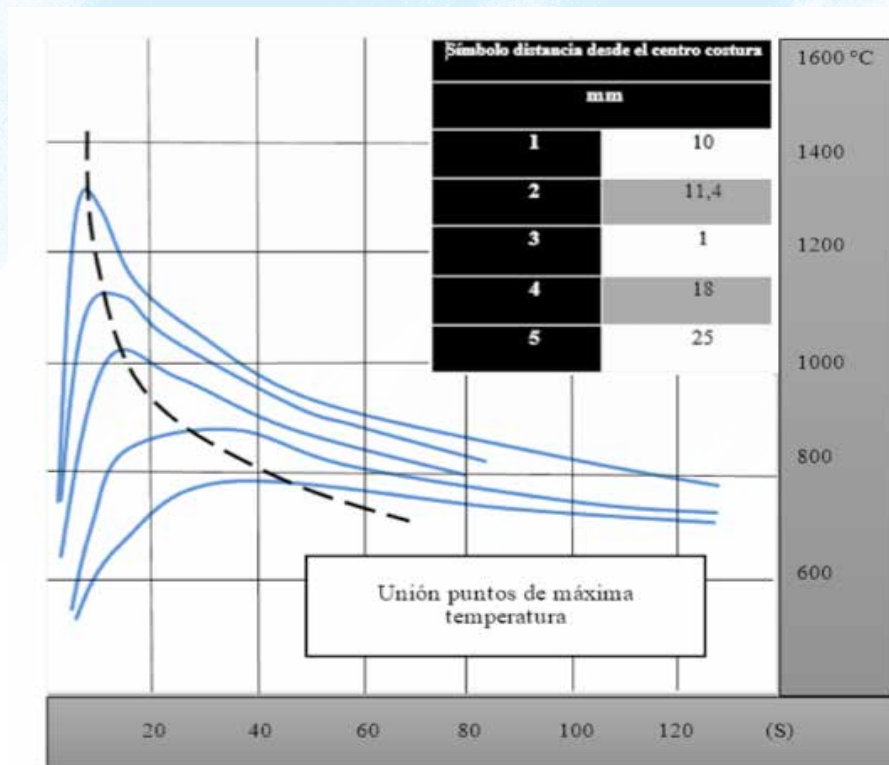


Figura 35 Variación de la temperatura en función del tiempo a diferentes distancias del eje de la costura en planchas de 12 mm de espesor, con una energía suministrada de 39 500 J/cm y una temperatura de precisión de 27°C

Ilustración. Héctor Terán

La curva de arriba presenta un máximo de temperatura de 1365 °C en un punto localizado a 10 mm del eje de la costura y la de abajo tiene un máximo de 520 °C a 25 mm del eje de dicha costura. Las curvas intermedias correspondientes a puntos de medición de 11.4, 14 y 18 mm, tienen puntos de máxima temperatura entre los rangos anteriores. La línea discontinua representa la unión de los puntos de máxima temperatura en los diferentes puntos de medición.

En el análisis de esta figura se pueden sacar las siguientes conclusiones:

1. La temperatura máxima alcanzada en el punto de medición, disminuye a medida que aumenta la distancia del eje de la costura.
2. El tiempo necesario para alcanzar la máxima temperatura crece a medida que aumenta la distancia del eje de la costura.
3. La velocidad de calentamiento y enfriamiento disminuyen a medida que aumenta la distancia de los puntos de medición con respecto al eje de la costura.

La Figura 36 muestra la influencia de la energía suministrada y la temperatura de precalentamiento sobre la máxima temperatura, en puntos a diferentes distancias del eje de la costura, específicamente en la zona de influencia térmica, en uniones soldadas realizadas mediante los procesos de soldadura manual por arco eléctrico sobre planchas de acero al carbono de 12 mm de espesor.

Las dos curvas de arriba se soldaron con una energía suministrada de 39,500 J/cm, y utilizando temperaturas de precalentamiento de 27 y 260 °C respectivamente, mientras que las dos de abajo se realizaron con las mismas temperaturas de precalentamiento, pero con una energía suministrada de 19,750 J/cm.

Estas curvas obtenidas con las condiciones térmicas anteriormente expuestas presentan las siguientes conclusiones:

1. La disminución de la energía suministrada y la temperatura de precalentamiento provocan una disminución de la máxima temperatura en el punto de medición.
2. Al aumentar la energía suministrada el punto de máxima temperatura se desplaza una distancia mayor con respecto al eje central de la costura,

por ejemplo, para una energía suministrada de 19,750 J/cm y un precalentamiento de 27°C, la máxima temperatura de 600 °C se encuentra a una distancia de 10,4 mm, mientras que con una energía suministrada de 39,500 J/cm y la misma temperatura de precalentamiento, ese mismo punto de máxima temperatura se encuentra a una distancia de 20 mm.

3. Al aumentar la temperatura de precalentamiento se aumenta la distancia existente entre el centro de la costura y los puntos críticos de líquido (1 480 °C), A_{c_3} (870 °C) y A_{c_1} (705 °C), para una misma cantidad de energía suministrada. En la tabla 4. se dan los valores de estas distancias para diferentes cantidades de energías suministradas y temperaturas de precalentamiento.

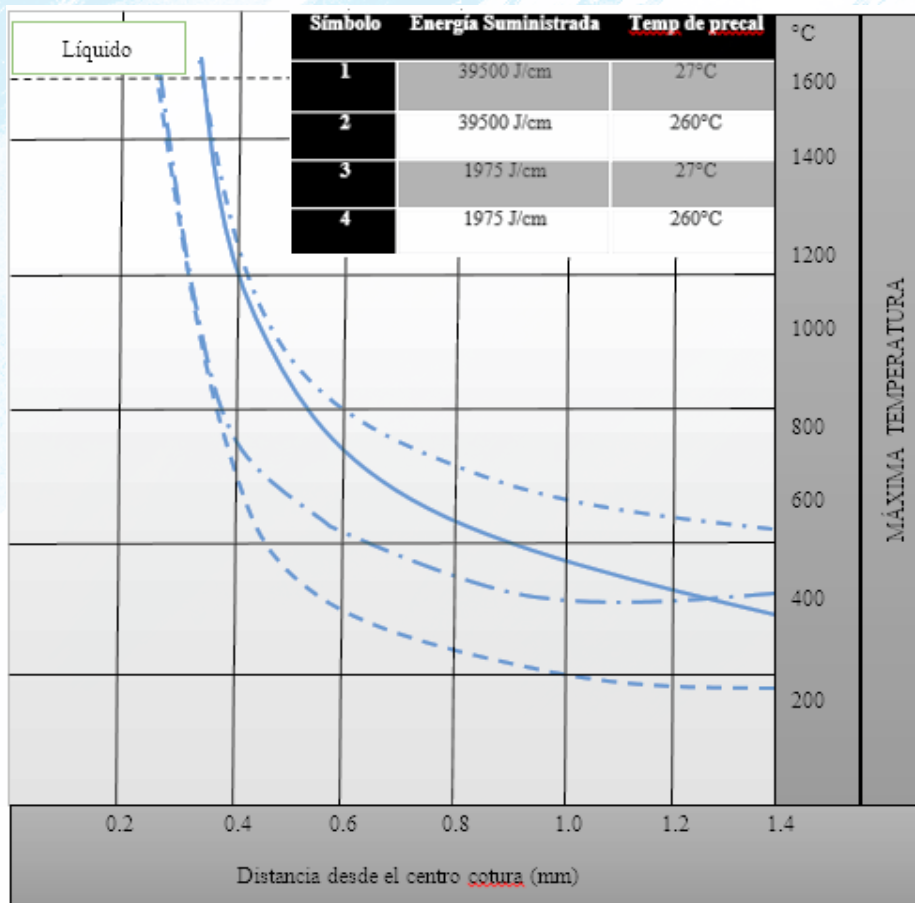


Figura 36 Influencia de la energía suministrada y la temperatura de precalentamiento sobre la distribución de la máxima temperatura, en planchas de acero de 12 mm de espesor, soldadas con procesos de soldadura manual por arco eléctrico

Ilustración. Héctor Terán

En la Figura 37 se muestra el efecto de la energía suministrada sobre las isotermas de la superficie de la plancha, con un arco eléctrico moviéndose de derecha a izquierda hasta el nivel cero marcado en el eje central.

En eje vertical se muestra la distancia desde el eje central del baño de soldadura, mientras que en eje horizontal se da la distancia desde el baño de soldadura hacia la parte de atrás del mismo. Las isotermas en la parte superior de la Figura muestran la distribución de la temperatura para una costura con una velocidad de soldadura de 1,27 mm/s, una energía suministrada de 39,500 J/cm y una temperatura de precalentamiento de 27 °C y las isotermas de la parte inferior fueron medidas con una velocidad de soldadura de 2,54 mm/s, una energía suministrada de 19,750 J/cm y los mismos valores de intensidad de corriente, tensión eléctrica y temperatura de precalentamiento.

Tabla 4 relación entre la temperatura de precalentamiento y la distancia desde el centro de la costura a los puntos críticos

Energía suministrada (J/cm)	Temperatura de Precalentamiento (°C)	Distancia desde el centro de la costura hasta los puntos críticos (mm)		
		Líquido 1 400 °C	Ac ₃ 870 °C	Ac ₁ 705 °C
39 500	27	9.4	13.2	15.3
39 500	260	9.4	13.2	20
19 750	27	7.3	9.1	9.4
19 750	260	7.3	9.4	10.6

Fuente. Héctor Terán

En la Figura 38 se muestra que la zona de influencia térmica es menor a medida que la energía suministrada disminuye y lo mismo sucede con la cantidad de metal calentado a la temperatura de 815 °C. Se debe plantear que estos efectos son más pronunciados a medida que la velocidad de soldadura aumenta, sobre todo a velocidades mayores que 5 mm/s, lo cual es frecuente en los procesos de soldadura automática.

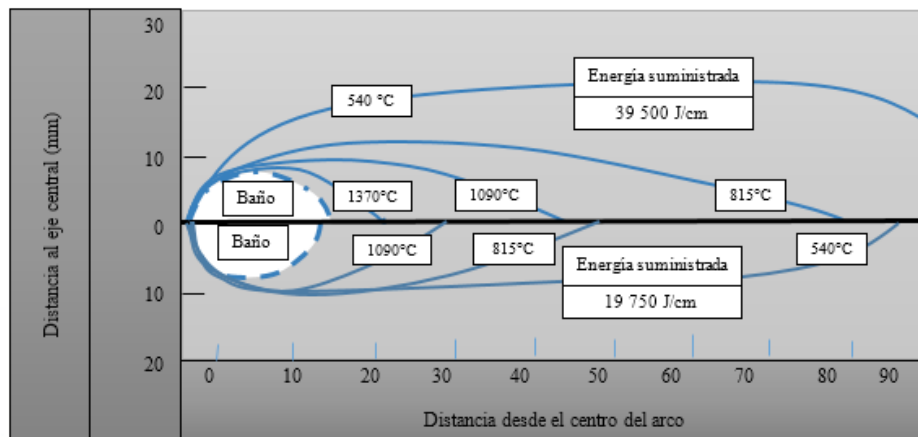


Figura 37 Efecto de la energía suministrada en la superficie de una plancha de acero de 12.7mm de espesor
Ilustración. Héctor Terán

g) Espesor del material base y tipo de unión soldada.

Se nota que al aumentar el espesor de la plancha la velocidad de enfriamiento tiende a aumentar, debido a que la conducción del calor es mayor, mientras que el tiempo a elevadas temperaturas tiende a disminuir.

La velocidad de enfriamiento es mayor en uniones en T que en uniones a tope, lo cual se debe a que los caminos de dispersión del calor en las uniones en T son mayores que en las uniones a tope.

h) Características térmicas del material base.

Las características térmicas del material base se evalúan a partir del concepto de difusividad térmica, que no es más que la razón entre la conductividad térmica del material y el producto de la densidad por el calor específico, tal como se muestra en la siguiente fórmula:

$$D_t = \frac{t}{f \cdot c} \quad (26)$$

Donde

D_t : Difusividad térmica [cm^2/s]

t : Conductividad térmica [$J/(s \cdot cm^2 \cdot ^\circ C)$]

f : Densidad [g/cm^3]

c : Calor específico [$J/(g \cdot ^\circ C)$]

Los materiales que tienen una difusividad térmica elevada provocan velocidades de enfriamiento grandes y tiempos a elevadas temperaturas muy cortos en el ciclo térmico de una costura soldada, tal es el caso del aluminio con respecto al hierro. Esto ocasiona que la temperatura en la superficie del material sea menor producto de que el calor se transfiere por conducción más rápidamente al resto de la masa del material dificultando la realización del proceso de soldadura.

i) Transformaciones estructurales.

En las uniones soldadas existe un amplio rango de temperaturas, desde el punto de fusión en la costura hasta el material base no afectada; el rápido calentamiento y enfriamiento propio de los procesos de soldadura posibilita el surgimiento de transformaciones estructurales con las siguientes características:

- Tendencia al crecimiento del grano.
- Tendencia a la formación de estructuras de mayor volumen específico.
- Disminución de algunas propiedades mecánicas.

Sin tener en cuenta la posibilidad de un cambio de material con la disminución del contenido de carbono, azufre, etc., las principales medidas tecnológicas para aumentar la soldabilidad son las siguientes:

- Selección adecuada del material de aporte
- Energía térmica lineal necesaria
- Precalentamiento
- Tratamiento térmico posterior

Clasificación de los aceros según su grado de soldabilidad

Se ha expresado que la soldabilidad de un material es una propiedad muy compleja y que en esencia queda condicionada a problemas metalúrgicos, operatorios y constructivos, de esto se desprende que la clasificación de los aceros, según su grado de soldabilidad, no es una cuestión fácil de determinar, sin embargo analizando la soldabilidad de un material desde el punto de vista integral como la capacidad de estos para ser unidos mediante procesos de soldadura y teniendo como uno de los criterios más importantes la soldabilidad metalúrgica, se pueden clasificar en tres grupos : soldabilidad buena, regular y mala.

Soldabilidad buena

Los aceros pertenecientes a este grupo son aquellos que pueden ser unidos mediante procesos de soldadura, sin que durante el desarrollo del proceso se presenten problemas, tales como: defectos, dificultad de ejecución del proceso, etc. Estos aceros tienen en general buena soldabilidad metalúrgica, operatoria y constructiva y entre algunos de ellos tenemos: aceros al carbono con contenidos de este elemento en cantidades menores a 0,3 %, aceros ligeramente aleados en los cuales la relación entre la suma de los elementos aleantes y el contenido de carbono no sobrepasan los valores de la tabla 5.

Tabla 5 Soldabilidad de los aceros

Suma de elementos aleantes (%)	Contenido de carbono (%)		
	Buena	Regular	Mala
Hasta 1	Hasta 0.25	0.25-0.45	Mayor de 0.45
1-3	Hasta 0.20	0.20-0.40	Mayor de 0.4
Mayores de 3	Hasta 0.18	0.18-0.38	Mayor de 0.38

Fuente. (Soldadura-metalurgia de la soldadura- procesos de la soldadura-soldabilidad, 2015)

Existen algunas recomendaciones en cuanto al espesor del material, el cual no debe sobrepasar los 40 mm y que la temperatura no sea inferior a los 5 °C.

Soldabilidad regular

Los aceros pertenecientes a este grupo son aquellos que pueden ser unidos mediante procesos de soldadura, pero aplicando técnicas auxiliares, tales como: precalentamiento, tratamiento térmico posterior (post weld heat treatment), fundentes especiales, etc. Cuando se aplican correctamente estas técnicas auxiliares la unión soldada es de buena calidad. En general estos aceros tienen algunos problemas en la soldabilidad metalúrgica, operatoria o constructiva y entre ellos tenemos los siguientes: aceros al carbono con contenidos de este elemento en valores entre 0,3 y 0,59 %, aceros ligeramente aleados en los cuales la relación entre la suma de los elementos aleantes y el contenido de carbono no sobrepase los valores de la tabla 5.

Algunos autores tienen tendencia a dividir este grupo en otros dos que son: los de soldabilidad satisfactoria y limitada.

Soldabilidad mala

Los aceros pertenecientes a este grupo no pueden ser unidos mediante los procesos de soldadura para obtener una unión soldada de calidad, inclusive con las técnicas auxiliares mencionadas anteriormente. Estos aceros tienen mala soldabilidad metalúrgica, operatoria o constructiva y entre algunos de ellos tenemos: aceros al carbono con contenidos de este elemento en cantidades superiores al 0.6% y aceros aleados en los cuales la relación entre la suma de los elementos aleantes y el contenido de carbono estén acordes a los valores dados en la tabla 5.

En algunos casos pueden ser soldados por procesos o métodos de soldadura muy especiales y en general nunca dan una unión soldada con la máxima calidad posible.



CAPÍTULO 4

Agrietamiento de la Uniones Soldadas

INTRODUCCIÓN

Los procesos de fabricación o reparación de piezas en industria mecánica tienen como objetivo la obtención de piezas con determinada calidad, sin embargo, esto no es siempre posible pues se pueden obtener productos con defectos; en los procesos de soldadura ocurren diferentes tipos de ellos entre los cuales se encuentran: grietas (cracks), falta de penetración, poros, etc. El más peligroso es el primero y ocasiona una unión soldada con poca resistencia mecánica. Por ser este defecto el más grave se le dedica un estudio más amplio.

El estudio del agrietamiento de las uniones soldadas se enfoca desde dos puntos de vista:

- Metalúrgico.
- Tecnológico.

Estudio metalúrgico

Se conoce que estructuralmente las uniones soldadas se dividen en dos partes: zona fundida y zona de influencia térmica, debido a que las características de estas zonas son diferentes, el estudio del agrietamiento también se divide en dos partes, que son: agrietamiento de la zona fundida y en zona de influencia térmica.

El agrietamiento en la zona fundida en general está relacionado con el tipo de material de aporte utilizado, el método de ejecución del proceso empleado, la formación de defectos tales como: inclusiones sólidas y gaseosas, etc.

El agrietamiento en la zona de influencia térmica y dentro de esta, en la zona de transición, tienen una relación muy directa con la soldabilidad del material base o con factores que afectan la fragilidad, tales como: precipitación de carburos, formación de fase σ , absorción de hidrógeno, etc. En muchas ocasiones las grietas surgen en unas de estas zonas y se prolongan hasta la otra.

En general lo más frecuente es que las grietas en la zona de influencia térmica se produzcan a temperaturas bajas, alrededor de 200 °C inclusive después de varias horas o varios días de haber realizado la unión soldada.

Estudio tecnológico

Desde el punto de vista tecnológico las grietas pueden dividirse en 3 grupos principales:

- Grietas en frío (cold crack).
- Grietas en caliente (hot crack).
- Grietas laminares (laminar crack).

Las grietas se pueden producir durante el período de solidificación del metal, las cuales pueden seguir el contorno de las dendritas, o se pueden formar en el estado sólido a altas temperaturas, como es el caso de las grietas intercristalinas de la zona fundida o en las aleaciones cuyas propiedades en caliente no son adecuadas tales como, por ejemplo, los aceros inoxidable austeníticos.

En general el surgimiento de las grietas puede ser como la suma parcial de varios factores o causas, o solo por una de ellas, lo cual es necesario investigar en cada caso en cuestión.

Los caminos que pueden seguir las grietas son los siguientes: interdendríticas, las que se producen en caliente, intercristalinas, las que siguen el contorno de la red cristalina del metal y Extra cristalinas, las que siguen otro camino.

Desde el punto de vista de su tamaño las grietas se pueden clasificar en: micro grietas, las que se observan con aumentos grandes; grietas, las que se observan a simple vista o con pequeños aumentos y roturas las que se observan a simple vista sin aumento.

Estudio metalúrgico del agrietamiento

En el estudio metalúrgico del agrietamiento se analiza el problema en la zona fundida y en la zona de influencia térmica.

Agrietamiento en la zona fundida. Causas metalúrgicas y secundarias.

Las grietas que se forman en la zona fundida de una unión soldada, generalmente surgen a altas temperaturas y durante el periodo de solidificación del metal, por ejemplo, el caso de las grietas que surgen en el cráter que se forma al terminar un cordón o una pasada en los procesos de soldadura. Las causas que pueden provocar el surgimiento de las grietas en la zona fundida pueden dividirse en dos grupos: causas metalúrgicas y secundarias.

Causas metalúrgicas

Las causas metalúrgicas del agrietamiento en la zona fundida pueden dividirse en tres aspectos principales, los cuales se estudian a continuación: condiciones de enfriamiento desde el estado líquido, transformaciones estructurales en la zona fundida y propiedades en caliente de los aceros.

Condiciones de enfriamiento desde el estado líquido.

Las condiciones de enfriamiento desde el estado líquido, puede ocasionar el surgimiento de grietas en la zona fundida producto de tres fenómenos diferentes, que son: formación del reheque, tensiones de contracción en el cordón solidificado detrás del baño de soldadura y tensiones de dilatación debidas a la separación de los bordes delante del baño durante el período de calentamiento. Estos tres fenómenos de forma individual o colectiva pueden ocasionar el agrietamiento en la zona fundida, por eso se estudian a continuación con el objetivo de conocer su mecanismo de formación y las causas que lo ocasionan, para poder dictaminar recomendaciones que atenúen al máximo el surgimiento del defecto tratado.



Figura 38 Grieta en el terminal de un cráter. X100
Ilustración. Héctor Terán

La formación del rechupe se presenta en el extremo del cordón, o sea, en el baño de soldadura cuando se retira el electrodo o la varilla bruscamente del mismo, presentándose un cráter más o menos profundo con la formación del rechupe en cuestión, el cual generalmente se encuentra acompañado por una grieta, tal como se observa en la Figura 38.

Durante la solidificación de una costura, generalmente en espesores pequeños el metal en estado líquido va pasando por diferentes fases durante su enfriamiento, tal como se observa en la Figura 39. En la primera etapa el metal en estado líquido a la temperatura T_1 , se forman los primeros gérmenes de cristalización dando lugar a las dendritas de un magma líquido, posteriormente al alcanzar el estado sólido a la temperatura T_3 todo el líquido se ha transformado en cristales primarios con dendritas tal estado está acompañado de un aumento de la densidad del metal y como consecuencia de una disminución de su volumen, lo cual conduce a la formación del cráter y del rechupe.



Figura 39 Fases del metal durante la solidificación
Ilustración. (Baralt, 2016)

Las tensiones de contracción en el cordón solidificado detrás del baño de soldadura, tal como se ilustra en la Figura 40, se deben a un estado de enfriamiento avanzado del cordón AB que precede a dicho baño y origina esfuerzos de contracción que inciden en el metal del cráter aún en estado líquido.

En el trabajo “ Tecnología de soldadura para la recuperación del domo de las Minas de Pinares de Mayarí “ se demuestra una de las causas de las grietas en las uniones de planchas a solape (en filete) de espesores grandes

(40 mm) independientemente de que los aceros empleados fueron de acero de bajo contenido de carbono, las cuales tienen aparentemente buena soldabilidad metalúrgica fueron la magnitud de las tensiones de contracción del cordón producto del espesor son las que causan las grietas.

Las tensiones de dilatación debida a la separación de los bordes delante del baño, durante el período de calentamiento, son las que se producen producto de la dilatación que origina el baño caliente y que tiende a separar los bordes, claro está, posteriormente durante el enfriamiento, estos bordes vuelven a su posición inicial.

Las grietas interdendríticas no tienen como una de las causas de su formación el efecto del rechupe, debido a que estas se originan en caliente, sin embargo, las que se producen en el período de solidificación si pueden tener como una de sus causas el fenómeno del rechupe.

Se ha comprobado que a medida que la separación entre los bordes de soldadura es mayor, la tendencia al agrietamiento aumenta sobre todo cuando estos valores se encuentran en magnitudes superiores a los 4 o 5 mm.

También se ha demostrado que la tendencia al surgimiento de las grietas aumenta a medida que se separa el electrodo del baño bruscamente, lo cual conlleva a que la cantidad de metal depositado es menor en comparación al volumen necesario entre los bordes de soldadura.

Como conclusiones finales con respecto a la eliminación de la tendencia al agrietamiento producto de las condiciones de enfriamiento desde el estado líquido se pueden enumerar las siguientes:

- a) Se debe aportar mayor cantidad de metal líquido al final del cordón, realizando un ligero retroceso del electrodo o varilla, con el objetivo de depositar en este sitio una cantidad mayor de metal que pueda alimentar el posible cráter o rechupe en esta zona.
- b) Aplicar un precalentamiento adecuado con el objetivo de disminuir la velocidad de enfriamiento y, por lo tanto, reducir al máximo las tensiones de contracción en el cordón solidificando detrás del baño de soldadura.
- c) Disminuir la separación de los bordes de soldadura, con el objetivo de disminuir las tensiones de dilatación debidas a este efecto durante el período de calentamiento.

2. Transformaciones estructurales en la zona fundida

Las transformaciones estructurales en la zona fundida de la unión soldada dependen entre otras cuestiones de dos factores fundamentales: modificaciones químicas debido a pérdidas o fijación de elementos y modificaciones estructurales.

La causa fundamental del agrietamiento de la zona fundida se debe a la formación de estructuras frágiles, debido a la naturaleza del material de aporte en forma de varillas o electrodos. Las grietas que pueden surgir en esta zona pueden ser, longitudinales (tipo 1) o transversales (tipo 2), Figura 41

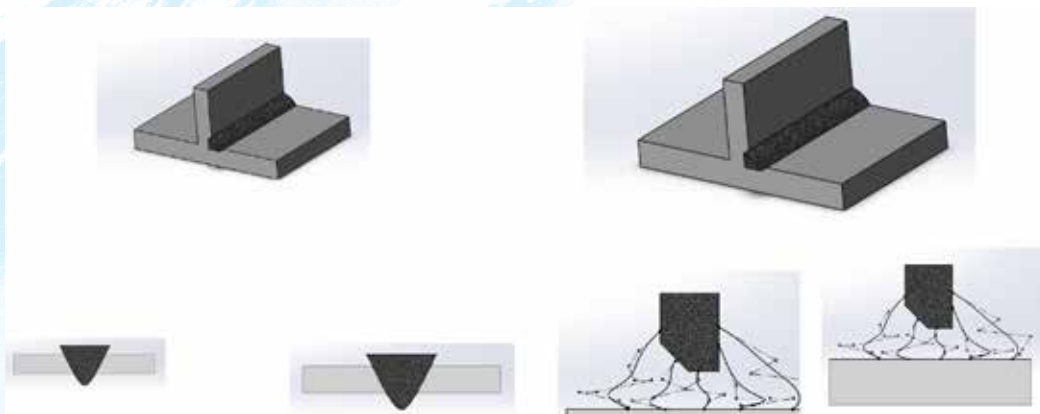


Figura 40 Tipo de grietas en uniones a tope y en T
Ilustración. Héctor Terán

Los aceros templeables o semitempleables, tales como los aceros al carbono con altos contenidos de este elemento y aceros de baja aleación, tienen una gran tendencia al agrietamiento producto de las tensiones internas provocadas por las transformaciones estructurales, las cuales originan dichas tensiones. El surgimiento de grietas en la zona fundida no solamente es producto de transformaciones estructurales en la misma, sino también se deben a un crecimiento exagerado del grano, tal como ocurre con los aceros ferríticos al cromo, siendo esta tendencia al agrietamiento mayor en uniones en T, donde las tensiones desarrolladas son más peligrosas. Es importante señalar que estas tendencias al agrietamiento crecen con el espesor de las piezas y con el empotramiento a que estén sometidas las costuras.

Las grietas transversales localizadas en la zona fundida (tipo 2), pueden prolongarse hacia la zona de influencia térmica (tipo 3), si la calidad del material base no es capaz de detener el crecimiento de esta.

En un recipiente cilíndrico de acero de bajo contenido de carbono que transporta mineral, en una atmósfera ligeramente reductora con temperaturas que oscilan entre (650 - 700) °C se presentan grietas (roturas) que ocasionan pérdidas económicas considerables a la empresa. Después de realizar las investigaciones pertinentes en las cuales se realizaron ensayos mecánicos, análisis metalográficos, dureza, etc., se concluye que el origen de las grietas se debió a: presencia de ferrita y perlita en forma de bandas con tendencia a la formación de ferrita acicular, también se observa estructura de Widmanstaetten, además de poros, óxidos y sulfuros deformados y orientados hacia la deformación plástica y grietas que surgen el curso de los sulfuros y óxidos.

3) Propiedades en caliente de los aceros

Las propiedades en caliente, o sea, a altas temperaturas que presentan algunos aceros que se estudian a continuación constituyen una de las causas fundamentales del agrietamiento en la zona fundida.

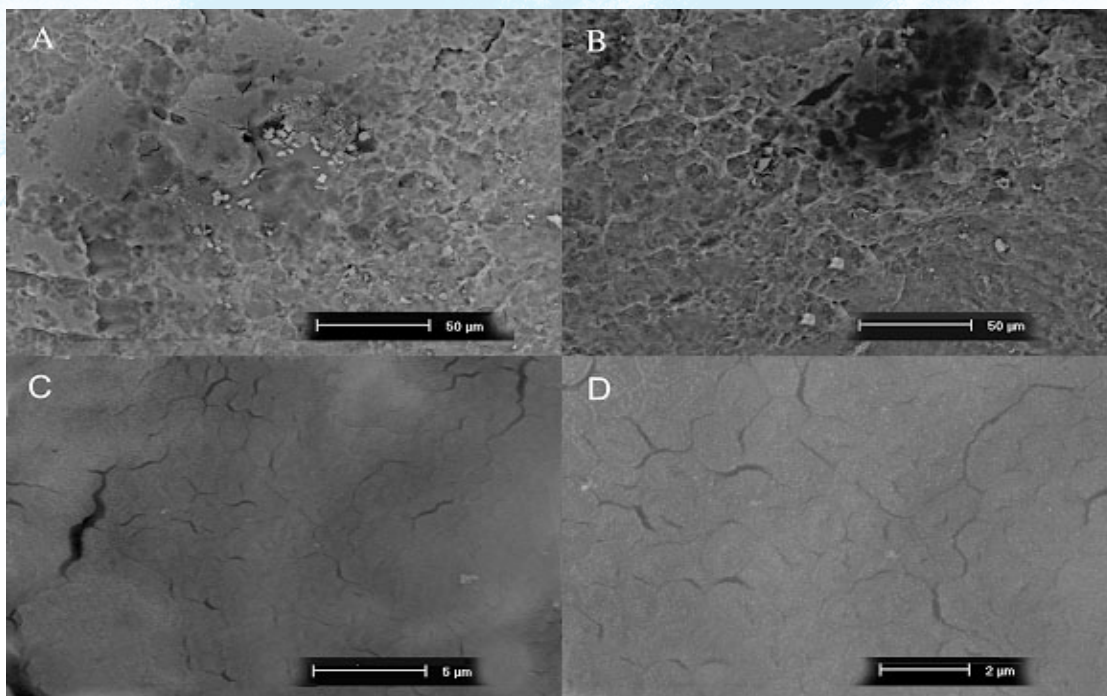


Fig. 4. Morfología (MEB) a diferentes magnificaciones de capas de alginato de sodio en discos de HAp con 40 % de porosidad aparente.

Figura 41 Micro grieta interdendríticas en una unión soldada de un acero austenítico (C=0.09%, Cr=18,8%, Ni=13.2% y Nb=0,5%)
Ilustración. (Puente, 2013)

Algunos aceros austeníticos tales como los aceros inoxidables con 18 Cr-8 Ni y aceros refractarios con alto contenido de cromo y níquel, tienen malas propiedades en caliente, lo cual conduce en ciertas ocasiones a la formación de micro grietas interdendríticas, tal como la que se observa en la Figura 44. Se conoce que esta tendencia al agrietamiento se encuentra gobernada por la presencia de determinada cantidad de fase de ferrita dentro de la fase de austenita, tal como se observa en la Figura 44.

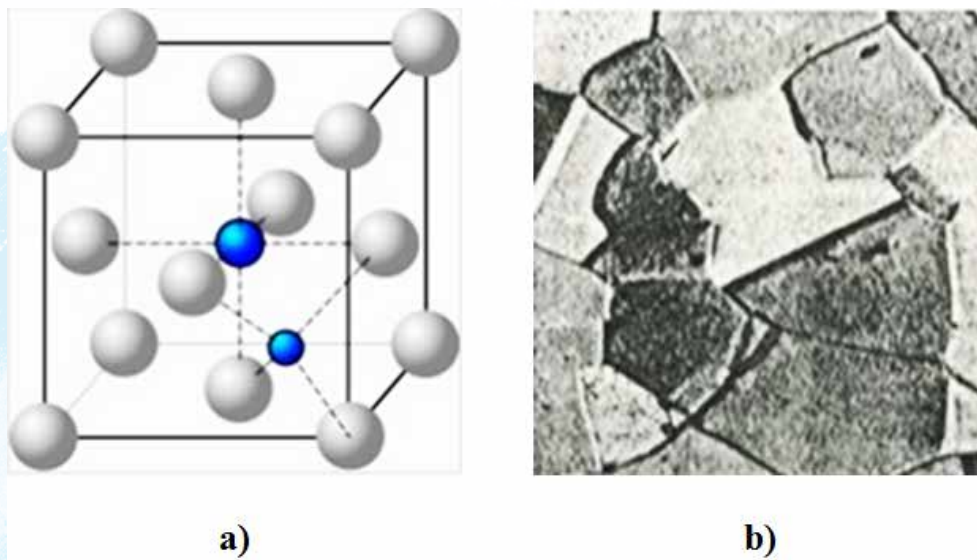


Figura 42 Estructura bifásica de austenita (a) y de ferrita (b) en una unión soldada de un acero austenítico X1000. Ilustración. (Puente, 2013)

Los aceros austeníticos refractarios con gran contenido de cromo y níquel como, por ejemplo, el 25Cr-12Ni y el 25Cr-20Ni, que se utilizan en equipos que trabajan a altas temperaturas, tienen gran tendencia al agrietamiento sobre todo el segundo debido a su estructura más austenítica. La selección de los electrodos para soldar estos materiales debe hacerse en función de esta tendencia al agrietamiento en caliente, de manera tal de obtener en el metal depositado la presencia o ausencia de determinada cantidad de fase de ferrita. Estos problemas de malas propiedades en caliente que presentan los aceros austeníticos al cromo níquel, se estudian posteriormente en los análisis de soldabilidad de dichos materiales.

Los aceros austeníticos con contenidos de manganeso entre 13 y 14 % tienen una gran tendencia al agrietamiento, debido a la formación de una red de martensita alrededor de los granos de austenita, producto de

pérdida o difusión de elementos gammágenos: C y Mn. Esta tendencia al agrietamiento aumenta a medida que aumentan los contenidos de C y Mn, se requieren aproximadamente contenidos de carbono de 0,9 y 1,2 % y entre 12 y 14 % de manganeso para reducir o evitar el surgimiento de grietas. La adición de níquel, el cual favorece la austenitización, constituye una solución satisfactoria para impedir las microgrietas, por ejemplo, en los aceros tales como el 0,8C-9 Mn-3Ni, se tienen como resultado grietas intergranulares, mientras que en aceros más cargados en Mn y Ni, tales como el 0.8 C - 12 Mn - 4.3 Ni, no se obtienen grietas de ningún tipo a pesar de las dimensiones de los granos de austenita.

En la soldadura heterogénea de dos aceros de diferentes composiciones químicas, la difusión de elementos de la zona de influencia térmica hacia la zona fundida puede conducir a la formación de microgrietas. Las uniones soldadas de aceros templables, con electrodos que dan como metal depositado estructuras austeníticas y el caso de las uniones soldadas de aceros ferríticos con altos contenidos de cromo con aceros que tienen menos contenido de este, dan lugar generalmente a formación de estructuras intermedias con una tendencia al agrietamiento mayor, debido a la formación de estructuras de martensita.

Causas secundarias

Existen otras series de causas del agrietamiento en la zona fundida que, si bien no constituyen causas metalúrgicas, no dejan de tener importancia como factores concretos que causan el surgimiento de grietas en la zona fundida, éstas son: selección inadecuada del material de aporte, mala regulación de la llama, empotramiento de la unión soldada, presencia de defectos, presencia de nitrógeno, exceso de separación de las planchas, gran diferencia de espesor, etc.

La selección incorrecta del material de aporte para unas condiciones de trabajo previamente determinadas, puede constituir la causa del agrietamiento en la zona fundida, tal como es el caso de la selección de un electrodo o varilla, de medio o alto contenido de carbono, que necesitan toda una serie de recomendaciones tecnológicas especiales, para soldar aceros de bajo contenido de este elemento, lo cual conlleva que al soldar los mismos y como producto de una selección errónea, se suelda con tales electrodos

y varillas, presuponiendo que son de acero de bajo contenido de carbono, no teniéndose en cuenta las recomendaciones tecnológicas especiales anteriormente descritas, y como resultado de todo esto se obtienen grietas en la zona fundida.

La mala regulación de la llama oxiacetilénica consiste en el empleo de una llama carburante u oxidante (oxidizing flame) en lugar de una reductora lo cual conlleva a una disminución de la ductilidad del metal depositado, debido a la fijación excesiva de carbono u oxígeno dando como resultado el agrietamiento.

El empotramiento de la unión soldada puede constituir grietas como es el caso de reparación de roturas en uniones soldadas que se encuentren en un lugar de la pieza que no permite la libre dilatación y contracción durante el calentamiento y enfriamiento de la pieza, o sea, roturas que se encuentren rodeada de material, esto conduce en algunas ocasiones a la rotura de la pieza en otros lugares durante el calentamiento, o el surgimiento de grietas en la zona fundida durante el enfriamiento, tal es el caso de la pieza que se observa en la Figura 46 donde la rotura en el brazo A presupone el calentamiento de los brazos B y C durante su reparación, debido a que los brazos pueden tener una sección transversal tal que no sea capaz de soportar las tensiones de dilatación desarrolladas durante el proceso de soldadura.

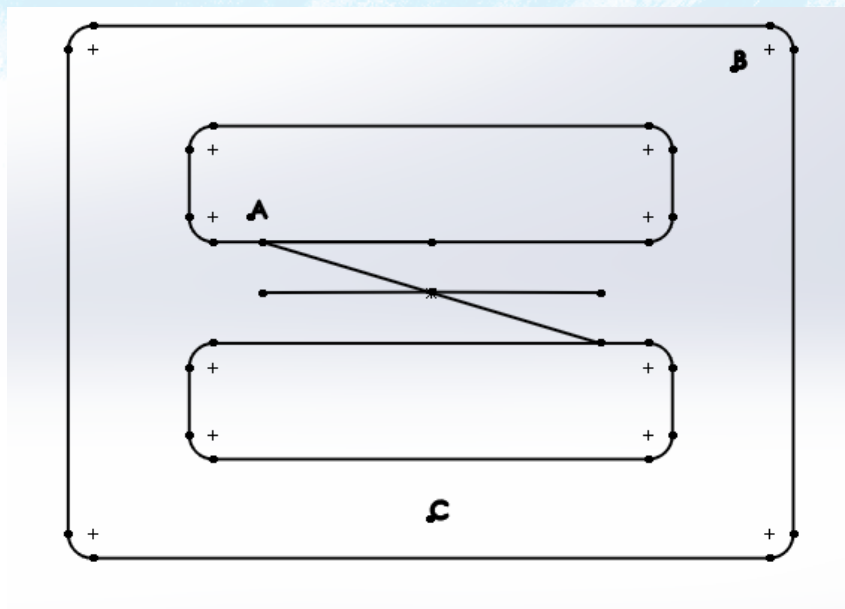


Figura 43 Empotramiento de una rotura
Ilustración. Héctor Terán

La presencia de defectos tales como poros o inclusiones de escorias de forma acicular, pueden constituir una fuente de desarrollo de grietas, producto de la concentración de tensiones que se originan en las crestas de estos defectos.

La presencia de nitrógeno puede ocasionar el surgimiento de grietas de la zona fundida, producto de la formación de nitruros, los cuales son muy frágiles.

El exceso de separación de las planchas ocasiona un aumento de la magnitud de las tensiones de dilatación y con esto el posible surgimiento de grietas.

Una gran diferencia de espesores puede ocasionar grietas debido a que en el espesor más grande la velocidad de enfriamiento es mayor y por lo tanto esto puede propiciar el surgimiento de estructuras de gran volumen específico y como consecuencia las grietas. En estos casos se debe biselar la más gruesa tal y como se recomienda en la norma correspondiente.

El escaso aporte de material a las uniones soldadas, sobre todo en el caso de uniones en T a solape etc. puede ocasionar grietas sobre todo cuando las piezas están sometidas a grandes cargas.

Los defectos de fabricación encontrados en las uniones soldadas de los reactores de fábricas de la industria alimenticia tales como: poros, socavaduras, etc. son concentradores de tensiones, y por lo tanto lugares donde con la presencia de agua, pueden surgir grietas por tensa corrosión. Además, el material se encuentra afectado por corrosión-picadura en algunas zonas de los cordones de soldadura, lo cual también puede ocasionar las grietas del tipo anteriormente mencionadas.

Agrietamiento de la zona de influencia térmica, causas metalúrgicas y secundarias

El agrietamiento de la zona de influencia térmica (ZIT) constituye el principal criterio para clasificar la soldabilidad de un material.

Las causas que pueden provocar el surgimiento de grietas en la zona de influencia térmica pueden dividirse en dos grandes grupos: metalúrgicas y secundarias.

Causas metalúrgicas

Las causas metalúrgicas del agrietamiento en la ZIT pueden dividirse en tres aspectos principales, que son: composición química del material base, presencia de hidrógeno y desarrollo de tensiones internas.

Composición química del material base

Los aceros que son capaces de dar estructuras de temple por enfriamiento al aire, tienen una gran tendencia al agrietamiento en la ZIT, siendo esta la causa de su mala soldabilidad, tal como ocurre con los aceros de alto contenido de carbono y en aceros aleados.

Los aceros al carbono-manganeso (C-Mn), que tienen la tendencia durante la solidificación de formar zonas de segregación de elementos templables pueden tener gran tendencia al agrietamiento, debido a que las zonas pobres en manganeso son las que primero se transforman en ferrita, mientras que el carbono se difunde a las zonas con alto contenido de manganeso, lo cual favorece el temple. El tratamiento térmico de homogeneización total de la pieza mediante normalizado a una temperatura de 1 280°C, puede eliminar este problema.

Los aceros que tienen partículas grandes de carburo que tardan en disolverse en la austenita, se agrietan con menos facilidad que los que tienen carburos finos, de esta forma se revelan el papel que tienen la naturaleza, las dimensiones y la distribución de los carburos en la tendencia al agrietamiento.

Se ha demostrado la influencia que tienen el C, Si, P y Ni, en la tendencia al agrietamiento de la ZIT a altas temperaturas y se piensa que él Si y el P, lo hacen de forma indirecta, por favorecer la segregación sulfurosa. El aumento del contenido de carbono aumenta la fragilidad del acero.

El azufre en forma de sulfuro de hierro (SFe) ocasiona el surgimiento de un eutéctico a los 985 °C, que se desarrolla en la zona de unión de los granos y aumenta la tendencia al agrietamiento, este fenómeno perjudicial puede eliminarse añadiendo manganeso, el cual tiene mayor afinidad por el azufre que el hierro y da lugar al sulfuro de manganeso (SMn) en forma aproximadamente esférica a una temperatura superior a la que se forma el eutéctico, de esta manera se evita la formación del SFe, aunque es bueno aclarar que esta transformación es incompleta debido a que el ciclo de soldadura es muy rápido. La influencia del azufre es mayor, mientras el contenido de carbono en el acero aumenta

Presencia de hidrógeno

La presencia de hidrógeno en la zona de influencia térmica y en la zona de transición es una de las causas del agrietamiento en las mismas. Se ha

comprobado que el agrietamiento en esta zona, se produce sobre todo cuando se suelda con electrodos ferríticos con revestimientos que contienen productos capaces de desprender hidrógeno. El agrietamiento que se produce por la presencia de hidrógeno es del tipo de fragilidad a temperaturas próximas a los 200 °C. La fragilidad debida al hidrógeno significa que el acero ha perdido ductilidad, esto se puede presentar en los procesos de soldadura. Esta ductilidad puede ser recuperada mediante tratamiento térmico. Se han encontrado roturas debido a fragilidad por hidrógeno en tubos de calderas y en equipos de refinerías de petróleo las cuales se encontraban trabajando en atmósferas de hidrógeno a altas temperaturas.

Se ha llegado a la conclusión de que se puede evitar el agrietamiento producto de la presencia de hidrógeno en la ZIT, cuando se suelda con electrodos de aceros inoxidables austeníticos al cromo-níquel (18Cr-8Ni) con revestimientos que no contengan ni celulosa ni materias higroscópicas, y también cuando se suelda con electrodos secados a una temperatura de 400 a 500 °C en los cuales se elimina la humedad.

La teoría de Zapffe explica de una forma adecuada la influencia de la presencia de hidrógeno en el agrietamiento, la cual se basa en la solubilidad de este elemento en el acero en función de la temperatura, y la misma plantea lo siguiente: en las uniones soldadas realizadas en atmósferas que contienen gran cantidad de hidrógeno, puede difundirse este a la zona del baño de soldadura y a la zona de influencia térmica en cantidades que dependen de la temperatura. Los átomos de hidrógeno se difunden en la red cristalina durante el calentamiento, pero durante el enfriamiento la solubilidad del hidrógeno en la red disminuye y entonces este elemento sale de la misma y se recombina instantáneamente a la forma molecular (H_2) la cual es insoluble en el metal, creándose grandes tensiones producto de la recombinación, la cual se produce generalmente, cuando el metal está en el período de solidificación y que sus valores pueden llegar a sobrepasar el límite de resistencia del material y agrietar localmente el acero.

La presencia de hidrógeno en la zona fundida de una unión soldada por arco eléctrico puede ocasionar la disminución de las propiedades mecánicas de la misma, esto depende fundamentalmente del tipo de revestimiento y de la cantidad de humedad en el mismo.

Durante el enfriamiento de una unión soldada, el exceso de hidrógeno que ha sobrepasado el límite de solubilidad, desarrolla tensiones internas producto de su recombinación en las discontinuidades, uniones intergranulares, poros, etc. Estas tensiones sumadas a la de las transformaciones estructurales y las originadas por efectos térmicos, pueden provocar el agrietamiento de la unión soldada pues sobrepasan los valores del límite de resistencia en estos lugares. La localización de las grietas y el hecho de que puedan evitarse, cuando el revestimiento se seca, presupone la idea de que el hidrógeno es la causa principal de este agrietamiento.

La rápida disminución de la velocidad de difusión del hidrógeno entre los 200 y 300 °C, la cual varía en relación de 1 a 10, puede explicar lo difícil que es eliminar éste a bajas temperaturas cuando se encuentra por sobre el límite de solubilidad.

En la actualidad se ha determinado el movimiento del hidrógeno en la zona fundida en los aceros de bajo contenido de carbono. Existen diferentes métodos para la determinación del contenido de hidrógeno entre los cuales se encuentran los siguientes: glicerina, mercurio y cromatografía de gases.

Desarrollo de tensiones internas

Las tensiones internas que se desarrollan en el proceso de soldadura, pueden ser provocadas por dos factores que son: el gradiente térmico desarrollado durante el ciclo térmico de soldeo y las transformaciones estructurales.

La creación de tensiones producto del gradiente térmico desarrollado durante el ciclo térmico de soldeo aumenta la fragilidad en la presencia de hidrógeno, y por lo tanto la tendencia al agrietamiento.

Se ha comprobado que, si una unión soldada no se ha agrietado durante el enfriamiento, la aplicación del tratamiento térmico posterior de calentamiento hasta la temperatura de 650 °C durante de 2 a 4 horas, según el espesor de la pieza en cuestión, disminuye las tensiones internas y al mismo tiempo favorece la salida de hidrógeno.

El desarrollo de las tensiones internas producto de las transformaciones estructurales tiene una importancia vital en el estudio de las causas del agrietamiento en la ZIT. Se conoce que la formación de la martensita conlleva un aumento del volumen específico en la red cristalina y está acompañada

por una deformación de la red cúbica del hierro α , con un desarrollo de tensiones marcado, lo que constituye el origen de la dureza y la fragilidad del constituyente. La presencia de la estructura de martensita en la zona de influencia térmica ocasiona la fragilidad de ésta, por pérdida de ductilidad, sobre todo cuando esté presente el hidrógeno.

La fragilidad de la zona de influencia térmica aparece frecuentemente cuando las transformaciones estructurales son del tipo de martensita o bainita inferior en éstas, acompañadas de hidrógeno difundido en cantidades más o menos importantes.

El criterio para determinar las transformaciones estructurales en la zona de influencia térmica es la dureza de las misma, acompañado esto también de un examen micro estructural. Existe una relación muy directa entre la tendencia al agrietamiento y la distribución de la dureza en esta zona, sin que esto constituya un criterio generalizado para evaluar la soldabilidad de un tipo de acero determinado. La medición de la dureza constituye un tipo de ensayo muy objetivo y sencillo, el mismo se realiza por el método Vickers o por el de micro dureza bajo pequeña carga, con el objetivo de poder realizar mediciones en zonas muy pequeñas y a la vez detectar en sí las estructuras de transformación. El carbono, manganeso y silicio tienen una influencia directa sobre el agrietamiento en la zona de influencia térmica, sobre todo el primero de estos. Se ha observado en un grupo de aceros al carbono-manganeso con planchas de 25 mm de espesor, los cuales han sido sometidos a procesos de soldadura, que a medida que aumenta el contenido de carbono de 0,17 a 0,32 % la tendencia al agrietamiento aumenta rápidamente.

Se ha llegado a la conclusión de que el manganeso y el silicio tienen una influencia sobre el endurecimiento de la unión soldada igual a cuatro veces menores que la del carbono y bajo esta concepción se ha desarrollado la fórmula del carbono equivalente, que da cuantitativamente la influencia de manganeso y el silicio sobre la base del elemento que tiene mayor influencia sobre el agrietamiento de la zona de influencia térmica, que es el carbono, la cual se da a continuación. Los valores del carbono, manganeso y silicio se introducen en la misma en por cientos.

$$[C] = C + \frac{Mn}{4} + \frac{Si}{4} \quad (27)$$

Causas secundarias

Existen otras causas que si bien no son metalúrgicas propiamente dichas, tienen una gran influencia a la tendencia al agrietamiento, estas son: la corrosión, la cual en presencia o no de tensiones puede causar el surgimiento de grietas, igual sucede en el caso de la corrosión intercrystalina que se presenta en los aceros inoxidable; la abrasión, que reduce de forma peligrosa el espesor de la plancha, los defectos en las planchas tales como inclusiones, poros, etc.; la presencia de tensiones que surgen en el proceso de laminado o de forja y la fatiga mecánica.

En unos recipientes cilíndricos de acero inoxidable 18/8 que trabajan en posición vertical en la industria alimenticia se presentaron grietas y problemas de corrosión durante el montaje y la prueba hermética en el montaje de los mismos. Después de realizar las investigaciones en lo que respecta a: inspección visual, ultrasonido, estructurales, de dureza y corrosión se considera que las causas de las grietas se debieron a: defectos de fabricación de las uniones soldadas tales como: poros, socavaduras, falta de metal, etc., los cuales son concentradores de tensiones y por lo tanto ocasionar las grietas por tensocorrosión; además el acero está afectado por corrosión picadura lo cual resulta como grietas por tensocorrosión.

En el año 1988 se presentaron grietas muy peligrosas en equipos de transportación de mineral de níquel en planchas de acero de bajo contenido de carbono y en uniones a solape que amenazaron con la posible parada de la producción; pero la determinación de las causas de las grietas, el diseño de la tecnología de la recuperación y la ejecución de la mismas, evitaron pérdidas económicas considerables a la economía de la empresa. Las principales causas de las grietas fueron: bajo valor útil del área de resistencia de la unión de filete, ausencia de precalentamiento y del secado de los electrodos. El diseño del proyecto tecnológico adecuado y su correcta ejecución evitó pérdidas económicas considerables a la empresa.

ESTUDIO TECNOLÓGICO DEL AGRIETAMIENTO

Grietas en frío

Características

Las grietas en frío son las que con mayor frecuencia se presentan en la práctica industrial y surgen a temperaturas inferiores a los 300 °C o después de terminada la unión soldada. Debido a que el tiempo de su formación es grande se denominan “Grietas demoradas”, estas pueden surgir en la zona fundida o en la zona de influencia térmica preferentemente cuando los granos son gruesos, o sea que exista cierto grado de sobrecalentamiento.

De acuerdo a su morfología pueden ser transversales o longitudinales y estas últimas surgen con mayor frecuencia en la raíz de la costura o en la zona de transición; las transversales generalmente surgen en la zona de transición o en el metal de la costura.

Las grietas en frío no siempre salen a la superficie de la pieza, sino que pueden quedar ocluidas, lo cual dificulta su detección y se diferencian de las grietas en caliente en que son menos quebrados y con menores aberturas; en la mayoría de los casos cuando estas grietas salen a la superficie no se oxidan o cuando lo hacen el espesor de la capa oxidada es pequeña, su coloración es marrón o azul.

Generalmente aparecen en aceros de alta resistencia y dependen de la composición química, tecnología aplicada y tipo de unión soldada.

En la práctica industrial se pueden prevenir aplicando precalentamiento y en ocasiones pos calentamiento.

Condiciones de surgimiento.

El inicio de estos tipos de grietas está condicionado a tres factores:

- a) Microestructura
- b) Difusión de hidrógeno
- c) Tensiones de tracción (compresión).

a) Microestructura

Para el surgimiento de las grietas en frío la microestructura de la zona de influencia térmica y de la zona fundida debe ser sensible al efecto de

la difusión del hidrógeno, como por ejemplo son la martensita y la bainita superior. El efecto de este factor se expresa mediante el carbono equivalente del IIW y otras.

b) Difusión del hidrógeno

Existen muchas teorías sobre el efecto del hidrógeno en la formación de las grietas en frío y una de las más aceptadas (Troizan) plantea que el hidrógeno se difunde hacia las zonas con estados de tensiones triaxiales contribuyendo a la pérdida de las fuerzas de cohesión sobre los átomos y por lo tanto al surgimiento de grietas.

Las principales fuentes del hidrógeno son: revestimiento de los electrodos y fundentes, humedad ambiental, gases impuros en atmósferas protectoras, bordes de soldaduras sucias (óxidos o grasas).

El precalentamiento y el empleo del pos calentamiento favorecen la eliminación del hidrógeno.

Las tensiones de tracción son el factor más importante para surgimiento de las grietas en frío; la magnitud de estas tensiones depende del espesor de la unión soldada, tipo de unión soldada y rigidez de ésta.

Grietas en caliente

Características.

Las grietas en caliente se pueden presentar en materiales austeníticos debido los efectos inducidos por los procesos de soldadura concerniente a las estructuras y tensiones. Se pueden presentar en la zona de la costura o en la de influencia térmica a altas temperaturas.

(Nota: 1- IIW (International Institute of Welding). (Instituto Internacional de Soldadura.)

a) Tensiones de tracción (compresión)

El metal puramente austenítico es más propenso a las grietas que el que contiene cierto por ciento de ferrita. En la solidificación de los aceros 18/8 solidifican primero los cristales de ferrita y las impurezas tales como P, S, O y Si quedan disueltas en el cristal de ferrita; el resto del metal con alto contenido de níquel tienen pocas impurezas. Con la disminución de la temperatura precipitan compuestos con óxidos, silicatos, fosfatos y sulfuros

y forman entre los cristales (límites del grano) películas que dan origen a las grietas en caliente.

Los procesos de soldadura automática bajo gases protectores inertes (MIG) son más propensos a las grietas en caliente que los de arco sumergido, y los menos propensos son los de soldadura manual por arco eléctrico; esto se debe a la forma de la penetración de la costura una forma de U. En la literatura especializada se brindan diferentes tipos de grietas en caliente en los procesos de soldadura bajo arco sumergido, por arco bajo gases protectores activos (MAG), por arco con electrodo refractario bajo gases inertes (TIG) y con electrodos tubulares.

Grietas laminares.

Este tipo de grietas se presentan en materiales roleados debido a la aplicación del proceso de soldadura y se forman por el surgimiento tensiones en la dirección del espesor del material.

Recomendaciones para evitar las grietas

Existen varias recomendaciones para evitar el agrietamiento en las uniones soldadas las cuales se estudian a continuación.

- 1- La utilización de electrodos con poco contenido de hidrógeno, tales como ciertos electrodos básicos, conducen a una disminución del agrietamiento.
- 2- El aumento de la energía calórica por unidad de longitud disminuye la cantidad de grietas en la unión soldada.
- 3- El empleo de un electrodo con alma de acero austenítico, por ejemplo, 18Cr-8Ni disminuye la tendencia al agrietamiento debido a la mayor solubilidad por el hidrógeno que tienen estos materiales, los cuales retienen a este elemento y evitan que se pueda difundir a la zona de influencia térmica.

En el caso de las soldaduras de los aceros con gran tendencia al agrietamiento en la soldadura por arco eléctrico con electrodos ferríticos, se pueden eliminar esta tendencia con la utilización de electrodos austeníticos.

4. El precalentamiento de las uniones soldadas, el cual disminuye la velocidad de enfriamiento es la recomendación más eficiente para evitar

el agrietamiento en la zona de influencia térmica. El precalentamiento tiene los siguientes objetivos:

- Disminuye la formación de transformaciones estructurales peligrosas y, por lo tanto, las tensiones que estas originan, dando lugar a la formación de estructuras menos peligrosas y de menor volumen específico.
- Facilita la difusión del hidrógeno de la unión soldada y, por lo tanto, disminuye la tendencia al agrietamiento por este defecto.
- Permite desprendimiento de otros gases con lo cual se elimina la formación de poros.

En general se puede plantear que la temperatura de precalentamiento de la pieza debe ser mayor, mientras más templable sea el acero.

5. Los electrodos deben ser secados a la temperatura y el tiempo de secado necesario.

Referencias

Japanese Standard Association. (1987). JIS Handbook of Welding. Japón.

AGA. (1988). Guía de electrodos y aleaciones especiales. México: s/a.

Aguilar, J. (1991). El titanio y sus aleaciones (II). Revista de soldadura, 203.

Allegheny Ludlum Steel Corporation. (1976). Welding of Stainless steel. Pennsylvania: EUA.

Aluminum Company of America. (1954). Welding Alcoa Aluminum. Pennsylvania: EUA.

American Welding Society. (1968). Welding Handbook (Sexta ed.). Miami, Fla: American Welding Society Publishers.

AMERICAN WELDING SOCIETY. (1996). MANUAL DE SOLDADURA. R.L.O'Brien. Amo, O. J. (1985). Soldadura de los aceros inoxidable. Consideraciones metalúrgicas. Revista de soldadura, 50.

Angulo, J. M. (2001). Curso de capacitación en soldadura. Editorial Limusa.

Aplicación de los métodos de ensayos no destructivos al examen de las uniones soldadas.(Líquidos penetrantes). (1981). Revista de soldadura, 113-130.

Arias, J. M. (1983). Soldadura eléctrica y sistema T.I.G. y M.A.G. Editorial Paraninfo.

ASM Handbook Committee. (1971). Welding Handbook. In A. H. Committee, ASM Handbook Committee (p. 734). EUA: ASM Handbook Committee.

Ass, a. (2017, Febrero). Ga. Retrieved from www.google.com

Auguste, P. (2000). Soldadura. Editorial Paraninfo .

AWS. (1966). Welding Handbook. In AWS, Metals and their weldability (p. 583). EUA: AWS.

Azuse, J. (1967). Soldadura de los aceros inoxidable. Bilbao: URMO.

B.A. (1980). Método para la determinación de la ferrita en el metal de la costura de los aceros alto aleados. Automatisheskaya Cbarka, 43-45.

Banks, B. (1971). Aspectos económicos de aplicación de las pruebas no destructivas. Welding and Metal Fabrication, 377-381.

Baño fundido y continuidad en la soldadura y el metal base. (n.d.). In C. Calderón.

Retrieved from http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf

Baralt, R. (2016, Enero 19). med.se-todo. Retrieved from med.se-todo: <http://med.se-todo.com/pravo/19635/index.html>

Basista, M., & Plamen, V. (1966). Opravarstve. Bratislava.

Bernstein, A. (1965). Las propiedades de los aceros inoxidable auténticos al cromo-níquel. *Welding Design and fabrication*, 32-36.

Boniszewski, T. (1971). Formulación de un revestimiento básico para electrodos de tipo experimental Cr:Mo (I). *Metals Construction*. Vol3, N° 1, (18-25)p.

Burgos, J. (1987). *Tecnología de la Soldadura*. Habana: Editorial Pueblo y Educación.

Chevenard, P., & Azcue, J. (1965). *Las Soldaduras*. Bilbao, España: Editorial URMO.

Cime. (1993). *Manual de Recuperación de Piezas*. Cuba.

CIME. (1993). *Manual de Recuperación de Piezas*. Cuba.

Costuras de las uniones soldadas. Tipos y elementos de diseño. (s.f). 84-3.

Cottrell. (1985). *Welding cast iron*.

Dixon, B. (1983). Sensibilidad de las grietas de solidificación (en caliente) en la comparación de tres procedimientos de soldadura. *Welding and metal fabrication*, 486-488.

Especificación para la soldadura de tubería de acero inoxidable austenítico (W-330) 22p. (1968).

Esteban José Domínguez, J. F. (n.d.). *FP Básica - Mecanizado y soldadura*. Editex.

FRANCISCO RAMÓN OROZCO ROLDÁN, C. L. (n.d.). *Soldadura en atmósfera natural*. Ediciones Paraninfo, S.A.

G. Malishev, Y. N. (1985). *Tecnología de los materiales*. MIR.

Gil, H. (2005). *Soldadura*. Grupo Planeta (GBS).

González, A., & Molina, A. (1994). Control de la corrosión intergranular en. *Revista de metalurgia*, 145-150.

Heriberto, R. (2011). *Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados*. Barranquilla.

- Horwitz, H. (1997). Soldadura: aplicaciones y práctica. Alfaomega.
- Houldcroft, P. T. (1980). Tecnología de los procesos de soldadura. Grupo Planeta (GBS).
- Howard, T. (2002). Fundición para ingenieros. Suecia.
- IK4-Lortek. (2017). IK4 LORTEX. Retrieved from IK4 LORTEX: <http://www.lortek.es/?content=274;metodos>
- International, A. (2003). Trends in Welding Research. Materials Park. Ohio: ASM International.
- Jeffus, L. (2008). MANUAL DE SOLDADURA GTAW (TIG). Editorial Paraninfo.
- Jeffus, L. (2009). Soldadura Principios y Aplicaciones. Editorial Paraninfo.
- Jeffus, I. (2009). Soldadura: principios y aplicaciones. Estados Unidos.
- LINCOLN ELECTRIC. (2017). In SOLDADURA SEMIAUTOMATICA CON GAS DE PROTECCIÓN (MIG-MAG) (p. 11).
- Lobjois, C. (2004). Uniones y soldaduras: provisionales y permanentes. Grupo Planeta (GBS).
- Manual técnico. (s.f). 96p.
- Manuel Mancheño, C. F. (2012). Manual de soldadura con electrodo revestido. Editorial Paraninfo.
- MARCOS, C. A. (n.d.). Soldadura con electrodos revestidos de chapas y perfiles de acero carbo. Ediciones Paraninfo, S.A.
- MARCOS, C. A. (n.d.). UF1626 - Soldadura TIG de acero carbono. Ediciones Paraninfo, S.A.
- MARCOS, C. A. (n.d.). UF1640 - Interpretación de planos en soldadura. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Martínez, J. (2000). Aplicación de métodos por ultrasonidos en los ensayos de materiales metálicos. Madrid.
- Materiales para soldar. (s.f). 59.
- Metales de aporte para la soldadura. (1964).
- MIKY. (2012, Julio 02). Soldadura/Welding. Retrieved from Soldadura/Welding: <http://weldingandmore.blogspot.com/2012/07/el-cordon-de-soldadura.html>

Molera Solá, P. (1992). Soldadura industrial: clases y aplicaciones. Marcombo.

Pino, J. M. (2011). Manual práctico de soldadura básico. StarBook Editorial, S.A.

Ponce, E. (2012, Agosto 20). scribd. Retrieved from scribd: <https://es.scribd.com/document/319091383/Tesis-Soldadura-Cadweld>

Proyecto de recomendaciones prácticas para el examen de rayos x de uniones soldadas por fusión en aluminio y sus aleaciones y magnesio y sus aleaciones en espesores inferiores a 50mm. (1968). URSS: CENIM.

Puente, L. (2013). Diagrama Fe-C. Tratamientos térmicos en los aceros.

R, J. C. (17 de enero de 2008). BOE. Obtenido de BOE: <https://www.boe.es/boe/dias/2008/01/17/pdfs/A03471-03496.pdf>

Rodríguez, P. C. (2012). Manual de soldadura: soldadura eléctrica, MIG y TIG. Alsina. Soldadura-metalurgia de la soldadura- procesos de la soldadura-soldabilidad. (2015). Retrieved from <http://blog.utp.edu.co/metalografia/capitulo-18-soldadura-metalurgia-de-la-soldadura-procesos-de-soldadura-soldabilidad/>

Taibe, E. (2013). In E. Taibe, MANEJO ADECUADO DE LOS MATERIALES DE SOLDADURA UTILIZADOS EN. Quito. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3348/1/T-UCE-0010-396.pdf>

Vallini, A. (1970). La soldadura del cobre y sus aleaciones. CENIM, 86-93.

Weeks, J. W. (1997). Técnica y Práctica de la soldadura. Reverte.

Welding and metal fabrication. (1986). EUA.

Welding Handbook. (1990). Suecia.

Bibliografía

- Japanese Standard Association. (1987). JIS Handbook of Welding. Japón.
- AGA. (1988). Guía de electrodos y aleaciones especiales. México: s/a.
- Aguilar, J. (1991). El titanio y sus aleaciones (II). Revista de soldadura, 203.
- Allegheny Ludlum Steel Corporation. (1976). Welding of Stainless steel. Pennsylvania: EUA.
- Aluminum Company of America. (1954). Welding Alcoa Aluminum. Pennsylvania: EUA.
- American Welding Society. (1968). Welding Handbook (Sexta ed.). Miami, Fla: American Welding Society Publishers.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. (1996). MANUAL DE SOLDADURA. R.L.O'Brien.
- Amo, O. J. (1985). Soldadura de los aceros inoxidable. Consideraciones metalúrgicas. Revista de soldadura, 50.
- Angulo, J. M. (2001). Curso de capacitación en soldadura. Editorial Limusa.
- Aplicación de los métodos de ensayos no destructivos al examen de las uniones soldadas.(Líquidos penetrantes). (1981). Revista de soldadura, 113-130.
- Arias, J. M. (1983). Soldadura eléctrica y sistema T.I.G. y M.A.G. Editorial Paraninfo.
- ASM Handbook Committee. (1971). Welding Handbook. In A. H. Committee, ASM Handbook Committee (p. 734). EUA: ASM Handbook Committee.
- Ass, a. (2017, Febrero). Ga. Retrieved from www.google.com
- Auguste, P. (2000). Soldadura. Editorial Paraninfo .
- AWS. (1966). Welding Handbook. In AWS, Metals and their weldability (p. 583). EUA: AWS.
- Azuse, J. (1967). Soldadura de los aceros inoxidable. Bilbao: URMO.
- B.A. (1980). Método para la determinación de la ferrita en el metal de la costura de los aceros alto aleados. Automatisheskaya Cbarka, 43-45.
- Banks, B. (1971). Aspectos económicos de aplicación de las pruebas no destructivas. Welding and Metal Fabrication, 377-381.

Baño fundido y continuidad en la soldadura y el metal base. (n.d.). In C. Calderón. Retrieved from http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf

Baralt, R. (2016, Enero 19). med.se-todo. Retrieved from med.se-todo: <http://med.se-todo.com/pravo/19635/index.html>

Basista, M., & Plamen, V. (1966). Opravarstve. Bratislava.

Bernstein, A. (1965). Las propiedades de los aceros inoxidable auténticos al cromo-níquel. *Welding Design and fabrication*, 32-36.

Boniszewski, T. (1971). Formulación de un revestimiento básico para electrodos de tipo experimental Cr:Mo (I). *Metals Construction*. Vol3, N° 1, (18-25)p.

Burgos, J. (1987). Tecnología de la Soldadura. Habana: Editorial Pueblo y Educación.

Chevenard, P., & Azcue, J. (1965). Las Soldaduras. Bilbao, España: Editorial URMO.

Cime. (1993). Manual de Recuperación de Piezas. Cuba.

CIME. (1993). Manual de Recuperación de Piezas. Cuba.

Costuras de las uniones soldadas. Tipos y elementos de diseño. (s.f). 84-3.

Cottrell. (1985). *Welding cast iron*.

Dixon, B. (1983). Sensibilidad de las grietas de solidificación (en caliente) en la comparación de tres procedimientos de soldadura. *Welding and metal fabrication*, 486-488.

Especificación para la soldadura de tubería de acero inoxidable austenítico (W-330) 22p. (1968).

Esteban José Domínguez, J. F. (n.d.). FP Básica - Mecanizado y soldadura. Editex.

FRANCISCO RAMÓN OROZCO ROLDÁN, C. L. (n.d.). Soldadura en atmósfera natural. Ediciones Paraninfo, S.A.

G. Malishev, Y. N. (1985). Tecnología de los materiales. MIR.

Gil, H. (2005). Soldadura. Grupo Planeta (GBS).

González, A., & Molina, A. (1994). Control de la corrosión intergranular en. *Revista de metalurgia*, 145-150.

Heriberto, R. (2011). Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados. Barranquilla.

- Horwitz, H. (1997). Soldadura: aplicaciones y práctica. Alfaomega.
- Houldcroft, P. T. (1980). Tecnología de los procesos de soldadura. Grupo Planeta (GBS).
- Howard, T. (2002). Fundición para ingenieros. Suecia.
- IK4-Lortek. (2017). IK4 LORTEX. Retrieved from IK4 LORTEX: <http://www.lortek.es/?content=274;metodos>
- International, A. (2003). Trends in Welding Research. Materials Park. Ohio: ASM International.
- Jeffus, L. (2008). MANUAL DE SOLDADURA GTAW (TIG). Editorial Paraninfo.
- Jeffus, L. (2009). Soldadura Principios y Aplicaciones. Editorial Paraninfo.
- Jeffus, I. (2009). Soldadura: principios y aplicaciones. Estados Unidos.
- LINCOLN ELECTRIC. (2017). In SOLDADURA SEMIAUTOMATICA CON GAS DE PROTECCIÓN (MIG-MAG) (p. 11).
- Lobjois, C. (2004). Uniones y soldaduras: provisionales y permanentes. Grupo Planeta (GBS).
- Manual técnico. (s.f). 96p.
- Manuel Mancheño, C. F. (2012). Manual de soldadura con electrodo revestido. Editorial Paraninfo.
- MARCOS, C. A. (n.d.). Soldadura con electrodos revestidos de chapas y perfiles de acero carbo. Ediciones Paraninfo, S.A.
- MARCOS, C. A. (n.d.). UF1626 - Soldadura TIG de acero carbono. Ediciones Paraninfo, S.A.
- MARCOS, C. A. (n.d.). UF1640 - Interpretación de planos en soldadura. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Martínez, J. (2000). Aplicación de métodos por ultrasonidos en los ensayos de materiales metálicos. Madrid.
- Materiales para soldar. (s.f). 59.
- Metales de aporte para la soldadura. (1964).
- MIKY. (2012, Julio 02). Soldadura/Welding. Retrieved from Soldadura/Welding: <http://weldingandmore.blogspot.com/2012/07/el-cordon-de-soldadura.html>

- Molera Solá, P. (1992). Soldadura industrial: clases y aplicaciones. Marcombo.
- Pino, J. M. (2011). Manual práctico de soldadura básico. StarBook Editorial, S.A.
- Ponce, E. (2012, Agosto 20). scribd. Retrieved from scribd: <https://es.scribd.com/document/319091383/Tesis-Soldadura-Cadweld>
- Proyecto de recomendaciones prácticas para el examen de rayos x de uniones soldadas por fusión en aluminio y sus aleaciones y magnesio y sus aleaciones en espesores inferiores a 50mm. (1968). URSS: CENIM.
- Puente, L. (2013). Diagrama Fe-C. Tratamientos térmicos en los aceros.
- R, J. C. (17 de enero de 2008). BOE. Obtenido de BOE: <https://www.boe.es/boe/dias/2008/01/17/pdfs/A03471-03496.pdf>
- Rodríguez, P. C. (2012). Manual de soldadura: soldadura eléctrica, MIG y TIG. Alsina. Soldadura-metalurgia de la soldadura- procesos de la soldadura-soldabilidad. (2015). Retrieved from <http://blog.utp.edu.co/metalografia/capitulo-18-soldadura-metalurgia-de-la-soldadura-procesos-de-soldadura-soldabilidad/>
- Taipe, E. (2013). In E. Taipe, MANEJO ADECUADO DE LOS MATERIALES DE SOLDADURA UTILIZADOS EN. Quito. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3348/1/T-UCE-0010-396.pdf>
- Vallini, A. (1970). La soldadura del cobre y sus aleaciones. CENIM, 86-93.
- Weeks, J. W. (1997). Técnica y Práctica de la soldadura. Reverte.
- Welding and metal fabrication. (1986). EUA.
- Welding Handbook. (1990). Suecia.
- Chevenard, J. A. (1965). Las Soldaduras. Bilbao, España: Editorial URMO.
- Chicaiza, E. F. (29 de Noviembre de 2013). dspace. Obtenido de dspace: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3348/1/T-UCE-0010-396.pdf>
- Committee, T. W. (1968). Welding Handbook.6ed. t.1 875p. EUA: American Welding Society Publishers.
- Banks, B. (1971). Aspectos económicos de aplicación de las pruebas no destructivas. Welding and Metal Fabrication, 377-381.
- Basista, M., & V., P. (1966). Opravarstve. bratislava.
- Bernstein, A. (1965). Las propiedades de los aceros inoxidable auténticos al cromo-níquel. Welding Design and fabrication, 32-36.

Boniszewski, T. (1971). Formulación de un revestimiento básico para electrodos de tipo experimental Cr:Mo (I). Metals Construction. Vol3, N° 1, (18-25)p.

Brian, D. (1983). Sensibilidad de las grietas de solidificación (en caliente) en la comparación de tres procedimientos de soldadura. Welding and metal fabrication, 486-488.

Burgos, J. (1987). Tecnología de la Soldadura. Habana : Editorial Pueblo y Educación.

Autores

Héctor Cochise Terán Herrera, Ingeniero Electromecánico, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Magister en Gestión de Energías y Magister en Seguridad Industrial y Riesgos del trabajo. Investiga en temas: Mecanizado en Máquinas Herramientas convencionales y de Control Numérico Computarizado, Procesos de soldadura, Metalurgia y Tecnología de la Fundición, Energías renovables, Automatización Industrial.

Víctor Hugo Andaluz Ortiz, es Ingeniero en Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional, y Doctor en Ingeniería en Sistemas de Control de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Sus áreas de investigación son en temas de relacionados a la robótica industrial, control cooperativo, control tele-operado, control inteligente, entre otras.

Oscar Bladimir Arteaga López, Ingeniero Mecánico, Escuela Politécnica del Chimborazo ESPOCH. Magister en Tecnología de la Información y Multimedia Educativa. Magister en Gestión de Energía. Investiga en temas: Diseño y Construcción de Bastidores y Carrocerías para Vehículos de competición (FORMULA STUDENT), Diseño y Construcción de vehículos blindados 4X4. Diseño y construcción de prótesis robóticas.

William Moisés Bonilla Jiménez, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, Diplomado Superior en Gestión del Aprendizaje Universitario, Magister en Gestión de Energías. Investiga en temas: Diseño de elementos de máquinas, Utilización de energías renovables en generación eléctrica para sistemas mecánicos.

Publicaciones Científicas

ISBN: 978-9942-765-28-4



9 789942 765284



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA