

SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES Y DISEÑO DE JUNTA

ANUAR ARRIETA TRESPALACIOS

LUIS GERARDO ARRIETA VELEZ

CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MINOR EN DISEÑO DE MAQUINAS

CARTAGENA

2003

SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES Y DISEÑO DE JUNTA

ANUAR ARRIETA TRESPALCIOS

LUIS GERARDO ARRIETA VÉLEZ

**Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director: LUIS CARLOS FABREGAS.
Ingeniero Metalúrgico UIS.**

**CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MINOR EN DISEÑO DE INGENIERIA MECANICA
CARTAGENA
2003**

Nota de Aceptación:

Presidente del Jurado

Jurado.

Jurado.

Cartagena de indias D.T y C Noviembre 7 del 2003

Señores:

Corporación Universitaria Tecnológica De Bolívar.
Facultad de ingeniería.
Programa de Ingeniería Mecánica.
Ciudad.

Cordial saludos:

Por medio de la presente hago constar que asesore la elaboración de la monografía titulada como. SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES Y DISEÑO DE JUNTA. Que se desarrollo por los estudiantes de la facultad de ingeniería Mecánica. **Anuar Arrieta T. Con código 9803018 y Luis Gerardo Arrieta V. Con código 9803035.**

Cumpliendo así con los requisitos exigidos por la universidad para la obtención del titulo profesional.

Atentamente:

Luis Carlos Fabregas.

Cartagena de indias D.T y C Noviembre 7 del 2003

Señores.

Comité Evaluador de Proyecto.

Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.

Estimados señores.

De manera más atenta presentamos a ustedes la monografía titulada como:

SOLABILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES Y DISEÑO DE JUNTA.

Como requisito para optar el título Profesional de ingeniero Mecánico.

Esperamos que cumpla con las normas establecidas por la facultad.

Cordialmente.

Anuar Arrieta. T.

Luis Gerardo Arrieta V.

TABLA DE CONTENIDO

Pag.

INTRODUCCION

RESUMEN

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ANEXOS

1.	El aluminio y sus aleaciones	16
1.1.	Obtención del aluminio	16
1.2.	Refinación del aluminio.....	23
1.3.	Procesos para la obtención de las formas comerciales	25
1.4.	Especificaciones del aluminio y sus aleaciones.....	27
1.5.	Tratamientos térmicos.....	32
1.5.1	Aleaciones de endurecimiento por trabajo.....	36
1.5.2	Aleaciones tratables térmicamente.....	39
2.	Factores que afectan la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones.....	42
2.1	Conductividad térmica.....	42
2.2.	Coeficiente de expansión térmica.....	42

2.3	Conductividad eléctrica.....	43
2.4	Capa de oxido de aluminio.....	43
3.	Soldadura del aluminio y sus aleaciones.....	53
3.1.	Principales procesos de soldadura para el aluminio y sus aleaciones.....	53
3.1.1.	Soldadura de resistencia.....	54
3.1.2.	Soldadura a Gas con Oxiacetilénica.....	56
3.1.3.	Soldadura por Arco Eléctrico con Gas Inerte (TIG y MIG).....	58
3.1.4.	Soldadura blanda.....	62
3.1.6.	Soldadura Dura	62
3.2.	Metales de aporte para aluminio y sus aleaciones.....	65
3.3.	Problemas prácticos en la soldadura del aluminio y sus aleaciones.....	66
3.4.	Variables a Considerar Durante la Selección del Material de Aporte.....	71
4.	Diseño de juntas Soldadas.....	76
4.1.	Reglas Fundamentales Para El Diseño De Uniones Soldadas Para El Aluminio Y Sus Aleaciones.....	81
	Conclusión.....	84
	Anexos	
	Reseña Bibliografía	

RESUMEN

En la actualidad el empleo del aluminio en diversos trabajos ha llevado a desarrollar mejores y nuevas aleaciones de este material. En las últimas décadas el aluminio ha evolucionado considerablemente siendo tal que se utiliza en muchos diseños, tales como el automóvil, aviones barcos, etc. Encontrado además que el proceso de producción es muy tedioso y costoso llevando así a que su utilización este restringida por los costos de producción y por el tipo de utilización, entre los procesos de producción se encuentra, lavado y triturado del mineral para reducirlos a polvo fino, Proceso Bayer para convertir la bauxita en alumina, y electrolisis para separar el aluminio de la alumina y del gas oxígeno.

Encontraremos que el aluminio se puede comercializar como, formas vaciadas, y formas forjadas, desarrollando esta última como el cuerpo y base de este trabajo.

Las aleaciones de aluminio y a su vez se dividen en; tratables térmicamente y no tratables térmicamente y se especifican según norma, ALUMINUM ASSOCIATION. Existen normas que difieren muy poco.

La soldabilidad del aluminio se aplica para ambos tipos de tratamientos, salvo algunas aleaciones no tratables térmicamente, que no se pueden soldar por procesos de soldadura de fusión. Los problemas y factores que más afectan a

Las aleaciones de aluminio en su soldabilidad se detallan en la sección dos del presente trabajo, cada uno de estos problemas deben ser reducidos y tenidos muy presente cuando se proceda a soldar las aleaciones de aluminio.

Entre los procesos más recomendados y aplicados para realizar trabajos con aleaciones de aluminio encontramos, la soldadura por resistencia, blanda, dura, oxiacetilénica, MIG, Y TIG, Referenciado tablas donde se muestran un sin número de aleaciones, su tipo de aplicación y características principales.

INTRODUCCIÓN

El empleo del aluminio y sus aleaciones ha tenido su aparición en los últimos siglos y ha dado un cambio en el empleo de los metales, su historia se remonta hacia el siglo XIX. El aluminio es el metal más extendido de la naturaleza después del silicio, y no se haya jamás en estado natural. Las rocas y tierras donde se encuentra no ofrecen las características que llaman la atención a los buscadores de metales.

El aluminio se emplea ante todo por su ligereza, su conductividad eléctrica y sus propiedades mecánicas que ofrece al trabajo de este junto con sus aleaciones cuándo se requiera.

Este trabajo presenta el proceso de producción y designación de las aleaciones del aluminio, como las aleaciones tratadas térmicamente y no tratadas térmicamente. Se tiene en cuenta que el aluminio se presenta en formas forjadas y en formas vaciadas, Además este trabajo hace énfasis en la producción forjada, ya que es como generalmente este material se encuentra en el mercado junto con sus aleaciones.

En su segunda parte recopilamos algunas teorías de los factores que afectan la soldabilidad del aluminio haciendo énfasis en la más importante.

En su tercera parte presentamos la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones, tomando los problemas prácticos de su soldadura al momento de que esta sea aplicada y mencionando los materiales de aporte que se necesitarían para aplicar dicha aleación.

En su cuarta parte presenta los diseños y esquemas de más uso para la unión de juntas soldadas del aluminio y sus aleaciones.

La soldabilidad se entiende por la facilidad con que un material se puede conformar por soldadura de sus partes, así como la habilidad de la unión para resistir las condiciones de servicio. El problema fundamental de la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones radica en factores que serán los estudiados, para poder afirmar que es posible tener el máximo de desarrollo de las aleaciones de aluminio y sus aleaciones.

Estos son:

1. Porosidad
2. Capa de oxido
3. Conductividad térmica.
4. Agrietamiento.

Para controlar y disipar estos factores se necesitara el conocimiento de este material y sus aleaciones.

Este trabajo de investigación será útil a los estudiantes y profesionales que deseen tener a la mano los métodos de cómo se debe proceder para trabajar con el aluminio y sus aleaciones al momento de su soldabilidad.

El objetivo de este trabajo es llevar acabo una investigación donde muestre los procesos más adecuados para la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones que conlleven a lograr una mejor productividad al momento de utilizar este material. Pero es de notar que la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones solo será para materiales forjados.

En forma teórica mostraremos los diferentes procesos de soldadura para unir aleaciones de aluminio y además señalaremos algunos de sus diseños juntas y hallar cual es el proceso mas adecuado para soldar este tipo de material.

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Propiedades del Aluminio.....	16
Tabla 2 Características del Aluminio.....	:17
Tabla 3. Designación del Aluminio y sus Aleaciones.....	:28
Tabla 4. Temperaturas para el Trabajo en Caliente, Fusión y Homogeneización.....	35
Tabla 5. Designación de la Aleación Endurecida por Deformación.....	38
Tabla 6. Designación de la Aleación Bajo el Tratamiento Térmico.....	41
Tabla 7. Procesos de Soldadura del Aluminio.....	53
Tabla 8. Soldadura blanda.....	63

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. La Bauxita.....	18
Figura 2. Diagrama de Flujo de los Metales.....	19
Figura 3. Horno Calcinador.....	21
Figura 4. Celda para la Electrolisis de la Alumina.....	23
Figura 5. Sección transversal de una celda de refinación (proceso Gadeau).....	24
Figura 6. Usos de las Aleaciones de Aluminio.....	26
Figura 7. Vaciado semi-continuo de templado directo Por enfriamiento brusco.....	34
Figura 8. El Arco voltaico.....	45
Figura 9. Forma Común de la Corriente Alterna.....	46
Figura 10. Arco del tungsteno.....	47
Figura 11. Limpieza del Oxido por el Arco Eléctrico.....	50
Figura 12. Soldadura por Resistencia.....	55
Figura 13. Proceso MIG.....	59
Figura 14. Proceso TIG.....	59
Figura 15. Difusión del Hidrogeno.....	68
Figura 16. Porosidad en el Aluminio en una Junta con Bisel.....	69
Figura 17. Grieta causada por agrietamiento en caliente.....	70
Figura 18. Uniones.....	78
Figura 19. Algunos Diseños de Juntas.....	79

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Designación de las Aleaciones Forjadas de Aluminios Bajo Diferentes Normas.....	87
Anexo B. Aplicación Practica de las Aleaciones de Aluminio.....	89
Anexo C. Temperatura de recocido y tratamiento de precipitación De la solución.....	91
Anexo D. Selección del Material de Aporte de las Aleaciones de Aluminio.....	92
Anexo E. Soldabilidad del Aluminio y sus Aleaciones.....	96
Anexo F. Propiedades Típicas de Algunas Aleaciones de Aluminio.....	98
Anexo G .Resumen de Formulas para Calcular los Esfuerzos Permisibles De Uniones Soldadas de Aluminio.....	100

1. EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

1.1 OBTENCIÓN DEL ALUMINIO

El aluminio pertenece a la familia III-A de la tabla periódica, junto con el Boro, Galio e Indio. Esta seguido después por el Sodio, Magnesio y es seguido por el Silicio.

Posee las siguientes propiedades y características:

Tabla 1. Propiedades del aluminio

PROPIEDADES	VALOR
Numero atómico	13
Peso atómico	26.9901
Radio atómico a 25 ° C	1.42885 Å
Valencia	3
Temperatura de fusión	660.2 ° C
Velocidad del sonido en el aluminio	5100 m/s
Coefficiente de dilatación térmica x10 ⁶	23 (20° - 100 ° C)
Densidad	2.699 g/cm ³
Conductividad térmica	209 W/ m ° K

Entre sus características encontramos:

Tabla 2. Características del Aluminio

Color característico	Metal blanco plateado con una alta reflectividad para la luz y el calor
Estructura cristalográfica	Cúbica centrada en las caras (fcc)

El aluminio es el tercer elemento de mayor abundancia en la tierra, después del oxígeno y el silicio, sin embargo, solo unos cuantos depósitos de dos minerales Aluminíferos se consideran con un potencial tal que su explotación sea fiable. Estos son la GIBSITA y la BOHEMITA, las cuales están formados por Al_2O_3 (alumina), y agua que mezclados con arena y arcillas, se les llama bauxita, nombre que procede de una villa francesa, LES BAUX, en la que se encontró el primer depósito.

El aluminio en su estado natural se presenta como compuestos, los cuales son muy dificultosos de reducir y de separar el aluminio de los demás elementos. Las fuentes principales de extracción del aluminio son los siguientes:

- Bauxita ($Al_3O_2 \cdot 2H_2O$) + Fe_2O_3 + SiO_2 + CaO + TiO_2
- Criolita ($Na_3 AlF_6$)

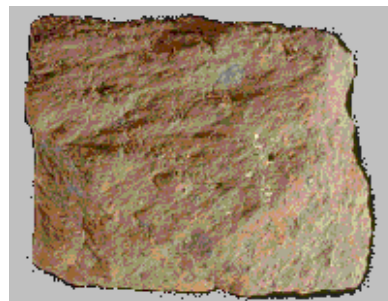
- Alunita ($KAl_3 (SO_4)_2 (OH)_6$)
- Leucita ($KAlSi_2O_6$)
- Lutita aluminosa

De todas ellas la forma menos costosa para producir aluminio es por medio de la bauxita. La forma de la bauxita es de una masa terrosa, granular, amorfa con variedad de colores que varían del blanco sucio, grisáceo, café amarillo o café negro (Vease Figura 1.)

La bauxita proviene de la descomposición e intemperismo de las rocas que contienen aluminio bajo condiciones tropicales y quizás formen depósitos residuales que reemplacen a la roca original o tal vez se transporten de su lugar de origen para formar depósitos en otra parte. Ella se extrae a cielo abierto y en resumen presenta los siguientes procesos de producción (ver figura 2):

- Lavado y triturado del mineral para reducirlo a polvo fino.
- Procesamiento BAYER, mediante el cual la bauxita se convierte en alumina pura (Al_2O_3).
- Electrolisis para separar el aluminio de la alumina y del gas oxígeno.

Figura 1. La *Bauxita*



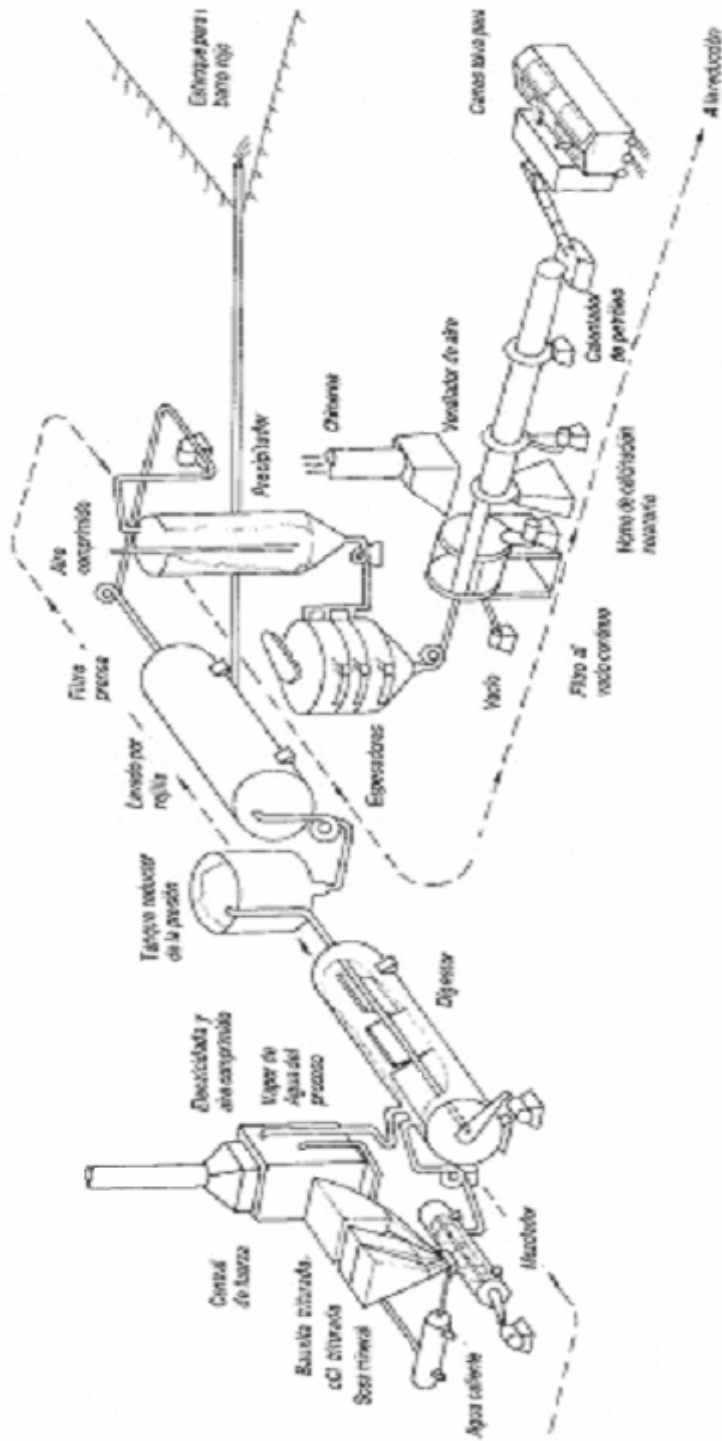


Figura 2 . Diagramas de flujo de los metales: bauxita a alumina.*

* . KING, frank. El aluminio y sus aleaciones, Limusa, Mexico, 1992. 335 p.

Estos procesos son necesarios debido a que la bauxita presenta un elevado punto de fusión superior a los 2000 ° C, lo cual sería muy difícil de fundir y sería costoso a la vez, ya que acarrearía un costo de suministro de electricidad muy grande.

Luego del proceso de lavado y triturado de la bauxita, se tamiza para eliminar material no deseado. La bauxita hecha polvo se pasa a unos recipientes de acero, llamado DIGESTORES que contienen sosa cáustica (NaOH), la cual se calienta a 165 ° C y se presuriza a 6 atmósferas. Acto seguido la alumina se convierten aluminato de sodio ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{Na}_2$) y la sílice (presente en la bauxita) se convierte en *aluminosilicato* de sodio, la cual gran parte de ella se precipita para formar un barro de desecho llamado "*barro rojo*". También los diferentes óxidos de fierros son deshidratados en los digestores para formar una solución sólida de Fe_2O_3 (*a*, alumina de hasta 10 %) el cual es cristalizado para formar parte del barro rojo, el cual se muestra su composición:

- 56-60 % Fe_2O_3
- 16-18 % Al_2O_3
- 2-3 % CaO
- 0.5 -1.5 % MgO
- 0.4-6 % Na_2O
- 6 – 8 % TiO_2

Este barro rojo es pasado por filtros de prensa. Después de esta filtración, hay

inclusiones de aluminato de sodio junto con una suspensión de coloidal de oxido de hierro y alumina que pasan a través de estos filtros. Este filtrado es bombeado a tanques cilíndricos de acero. De allí se deja enfriar y la solución $\text{Al}(\text{OH})_3$ se precipita y se evacua mediante filtración y después es calcinada a temperaturas entre 1200 y 1300 ° C en hornos calcinadores giratorios(ver figura 3) y dejan como resultado la alumina en forma de polvo.

Esta reacción en el calcinador se muestra como:

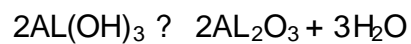


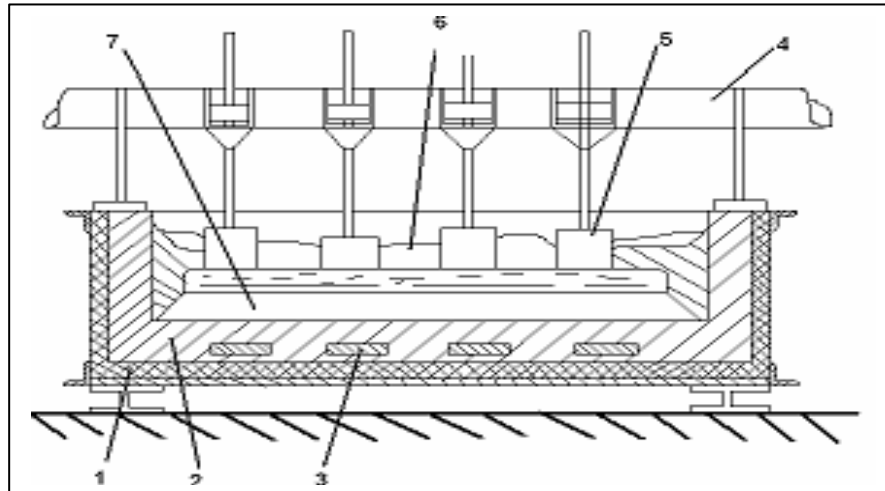
Figura 3. Horno Calcinador



Ya reducida la alumina es pasada a electrolisis para separar el aluminio del

oxígeno. La producción del aluminio a partir de la alumina consiste en la descomposición (electrolisis) del óxido de aluminio en sus componentes, bajo un baño de criolita fundida. Esta criolita actúa como disolvente de la alumina y rebaja su punto de fusión que es de aproximadamente 2000 °C. en la figura 3 se muestra el esquema de una celda electrolítica. Esta se compone de una caja de hierro con un revestimiento termoaislante 1. Las paredes y el fondo de la celda están revestidos con carbón comprimido 2. Las barras colectoras catódicas 3 puestas en el fondo se conectan con el polo negativo de la fuente de corriente, donde las barras colectoras anódicas 4, se unen los electrodos de carbón 5 sumergidos en la celda. Antes de comenzar la electrolisis se coloca en el fondo una capa fina de coque desmenuzado, se bajan los electrodos hasta que toquen al coque y se conecta la corriente. Cuando esto ocurre el carbón comprimido se calienta al rojo, luego se introduce la criolita y acto seguido se lleva a fusión la carga de alumina 6, no más que el 15 % de la cantidad de criolita cargada. Una vez conseguida esta proporción se fija la temperatura del electrolito en los límites de 950-1000 ° C. A medida que se descompone la alumina, el aluminio reducido 7 se va acumulando en el fondo de la celda y se carga nueva alumina conforme esta valla evacuando la celda por medio de sifones.

Figura 4. Celda para la Electrolisis de la Alumina



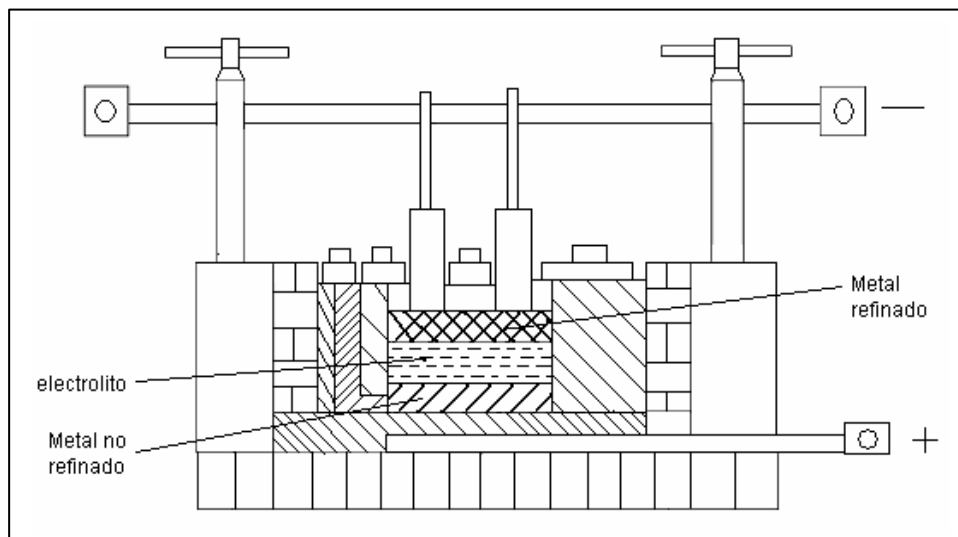
1.2 REFINACION DEL ALUMINIO

Ya reducido el aluminio por electrolisis, este presenta una pureza entre 99.5 y 99.7 % y el resto de su porcentaje se refiere a impurezas como hierro y silicio. Para producir aluminio comercial de alta pureza (mayor a 99.9 %) hay que hacer un proceso extra llamado refinación del aluminio. este consiste en una refinación electrolítica , en donde las impurezas son llevadas a partes por millón dentro de la mezcla . La refinación electrolítica consta en una celda (parecida ala que se utiliza para separar la alumina del oxigeno) en el cual el aluminio que se ha de purificar es introducido en la parte inferior de la celda (figura 4), ya sea en estado sólido o fundido en un canal lateral, en donde se va adicionándolo a medida que es sacado el aluminio puro por medio de sifones. El fundente o electrolito en el que se

disuelve el aluminio debe tener una densidad menor que el aluminio impuro y mayor al aluminio puro y sirve para separa la capa del metal refinado con el no refinado (ver figura 5.) Existen diferentes clases de fundentes; como son:

- Fluoruro , que opera a 950-1000 °C
- Fluoruro –cloruro que opera a 740 °C

Figura 5. Sección Transversal de una Celda de Refinación (Proceso Gadeau)



Una celda de este tipo consume 20KA y produce 160 Kg de material refinado por día y el peso de las impurezas eliminadas llaga a 0.48 – 0.80 Kg por día. Esta refinación se amerita debido a que el aluminio súper puro es muy utilizado en la industria de avanzada como es el caso de súper conductores utilizados en los satélites espaciales.

1.3 PROCESOS PARA LA OBTENCION DE LAS FORMAS COMERCIALES

El aluminio por ser un material muy dúctil y de alta capacidad de absorción de energía, es capaz de someterse a innumerables procesos de fabricación, mencionado algunos ejemplos más importantes como son:

- Laminación
- Forjado
- Extrusión
- Vaciado

De las cuales los productos que podemos encontrar en el mercado son también innumerables , tal es el caso de los pistones de los motores de combustión interna , que son aleaciones vaciadas de aluminio-silicio , el bloque del motor , las planchas de estructura del avión , naves espaciales , blindajes de satélites y otros como vemos en el anexo B :

Formas de presentación:

- Barras
- Platinas
- Hojas delgadas
- Laminas
- Alambres

Los usos de las aleaciones son innumerables, pero en este caso, les mostramos las más importantes a continuación:

Figura 6. Usos de las Aleaciones de Aluminio.

Transporte



Construcción



Empaques



Fuente: http://www.aluminio.com.ve/sector/pag_esp/aluminiocont.html

1.4 ESPECIFICACIONES DE LOS ALUMNIOS Y SUS ALEACIONES

El aluminio y sus aleaciones como vimos anteriormente se dividen en:

- Formas vaciadas
- Formas forjadas

El aluminio y sus aleaciones forjadas son especificados por la ALUMINUM ASSOCIATION. Existen muchas designaciones que difieren muy poco, de país en país. En esta obra les mostraremos las designaciones bajo la ALUMINUM ASSOCIATION, por UNS (UNITED NUMBERING SYSTEM) Y INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) Y EL CEN (COMITÉ EUROPEËN DE NORMALISATION) que es manejado por la ISO. La ISO difiere de la ALUMINUM ASSOCIATION debido a que especifica el elemento o los elementos aleantes preponderantes del aluminio, mientras la ALUMINUM ASSOCIATION se baja en una serie de dígitos como vemos:

Tabla 3. Designación del Aluminio y sus Aleaciones

Norma de la ALUMINUM ASSOCIATION	comentario
1xxx	Aluminio puro
2xxx	Aluminio y cobre
3xxx	Aluminio y manganeso
4xxx	Aluminio y silicio
5xxx	aluminio y magnesio
6xxx	Aluminio con magnesio y silicio
7xxx	Aluminio y zinc
8xxx	Otras aleaciones
9xxx	No utilizada

La norma ISO No. R209 que es la norma para la designación del aluminio difiere de la *ALUMINUM ASSOCIATION* debido a que la norma ISO , coloca en letras a los elementos que intervienen en la aleación, primero el aluminio (Al) y luego el segundo elemento principal de la aleación y por ultimo su porcentaje en la aleación . Como vemos en el siguiente ejemplo:

5052: ALMg2.5

5251: ALMg 2

Designación de las aleaciones Se hará con un numero de 4 cifras: XXXX (1 2 3 4)

-
- 1 Es la primera cifra, nos establecerá el GRUPO a que pertenece la aleación. Remítase a la tabla 4.
 - 2 La segunda cifra nos designa modificaciones que se han efectuado a las aleaciones ya establecidas. Cuando es 0 corresponde a la aleación original.
 - 3 Las dos ultimas cifras nos servirán para numerar las
 - 4 aleaciones, haciéndose notar que no pertenecen al orden cronológico de su establecimiento
-

En el anexo A, se muestra las diferentes normas y en cuanto a los elementos aleantes presentes, se muestran las siguientes características:

- Aleación 1xxx: Esta aleación tiene un contenido en aluminio mínimo del 99.0 % siendo las principales impurezas el hierro y silicio (elementos aleantes) se aporta una adición del 0.12 % de cobre para obtener mayor resistencia. La aleación 1100 tiene una resistencia a la tracción de unos de unos 13 Ksi (90 MPa) en condiciones de recosido y se destina principalmente para aplicaciones de trabajo de laminación de metales.

- Aleación 2XXX: El principal elemento aleante de las aleaciones de este grupo es el cobre, pero la mayor parte de estas aleaciones contienen también magnesio. También se añaden pequeñas cantidades de otros elementos. Una de las aleaciones de este grupo es la 2024, que contiene alrededor de un 4.5 % de Cu, un 1.5 % de Mg y un 0.6 % de Mn. Esta aleación se encuentra reforzada principalmente por los mecanismos de endurecimiento por solución sólida y reforzamiento por precipitación. Un compuesto intermetálico de composición aproximada a la de Al_2CuMg es el principal precipitado reforzado. La aleación 2024 en la condición T6 tiene una resistencia a la tracción de unos 64 Ksi (442 MPa) y se utiliza por ejemplo, para estructuras de aviones.

- Aleación 3XXX: El elemento Principal de las aleaciones de este grupo es el manganeso y refuerza el aluminio principalmente por reforzamiento en solución sólida. La aleación más importante de este grupo es la 3003, que es esencialmente una aleación 1100 con la adición de aproximadamente un 1.25 % de manganeso. La aleación 3003 tiene resistencia a la tracción de unos 16 Ksi (110 MPa) en condición de recocido y es la aleación de uso general que se emplea frecuentemente cuando se requiere buena trabajabilidad.

- Aleación 5XXX: El magnesio es el principal elemento aleante de las aleaciones de este grupo y se añade para conseguir reforzamiento en solución sólida, en cantidades de hasta aproximadamente un 5 %. Una de las aleaciones industriales más importantes de este grupo es la 5052, que contiene alrededor del 2.5 % de magnesio (Mg) y del 0.2 % de cromo (Cr). En la condición de recocido, la aleación 5052 tiene resistencia a la tracción de unos 22 Ksi (193 MPa). Esta aleación se utiliza también en trabajos de laminación de metales, particularmente para autobuses, camiones y aplicaciones marinas.

- Aleación 6XXX: Los principales elementos para el grupo de 6xxx son magnesio y silicio, que se combinan entre sí para formar un compuesto intermetálico, Mg_2Si , que, en forma de precipitado, refuerza este grupo de aleaciones. La aleación 6061 es una de las aleaciones más importantes de este grupo, y tiene una composición aproximada de 1.0% Mg 0.6% Si, 0.3% Cu y 0.2% Cr. Esta aleación en las condiciones T6 del tratamiento térmico posee una resistencia a la tracción de unos 42Ksi (MPa) y es utilizada para fines estructurales de carácter general.

- Aleación 7XXX: Los principales elementos aleantes de las aleaciones de aluminio del grupo 7xxx son cinc, magnesio y cobre. El cinc y el magnesio

se combinan para formar el compuesto intermetálico Mg-Zn. Es el precipitado básico que refuerza estas aleaciones cuando son tratadas térmicamente. La solubilidad relativamente alta del zinc y del magnesio en aluminio hace posible la creación de una densidad alta de precipitado y, por eso, produce grandes aumentos en la resistencia. La aleación 7075 es una de las aleaciones más importantes de este grupo y tiene una composición aproximada de 5.6 % Zn, 2.5 % Mg, 1.6% Cu y 0.25% de Cr. La aleación 7075 cuando es tratada térmicamente a endurecimiento T6 tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente de 73 ksi (504 MPa) y se usa principalmente en estructuras de aviones.

1.5 TRATAMIENTOS TERMICOS

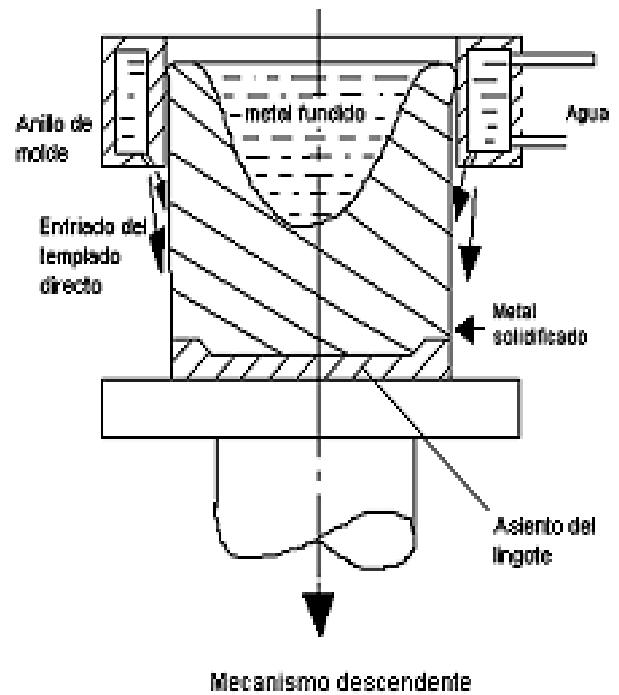
Los tratamientos térmicos se aplican a las formas comerciales ya sean a los fundiciones en forma de lingotes (materia prima para la fabricación de las demás formas) o los rollos, hojas, platinas, barras, etc. Se lleva a cabo antes y después del trabajo en caliente y en frío. Son trabajados antes, debido a que el aluminio puro es fundido en un horno de vaciado por templado directo y enfriamiento brusco (ver figura 4) el cual es la base para crear las aleaciones de aluminio. Este vaciado rebaja las propiedades mecánicas del material, debido a la aparición de defectos puntuales, como son vacantes, intersticios, los cuales asoman por la vibración térmica de la estructura del cristal. Al aumentar la temperatura, la

Intensidad de esta vibración se acrecienta, presentándose la probabilidad de una desorganización estructural (efectos puntuales) imposibilitando su trabajo en frío o en caliente posterior.

Para poder aumentar la ductibilidad de estos lingotes de aluminio son tratados en un tratamiento conocido como:

Homogeneización: Es un tratamiento de alta temperatura y se aplica a las aleaciones en bruto (lingotes) para eliminar las estructuras dendríticas y segregadas, lo cual alivia los esfuerzos remanentes debido al enfriamiento rápido de la pieza y permitir que la difusión atómica consiga una composición uniforme en el lingote. La homogeneización se realiza por un tratamiento prolongado de alta temperatura, coincidente con la temperatura de disolución que se usa en el endurecimiento por precipitación. Esta alta temperatura favorece la difusión de los elementos. Esto crea que las aleaciones se han mas aptas para responder a otros tratamientos térmicos, mejora las propiedades de las piezas vaciadas, aumenta la ductibilidad de las aleaciones transformadas y rebaja la temperatura de recristalización.

Figura 7. Vaciado Semi-Continuo de Templado Directo por Enfriamiento Brusco.



Como vemos en la tabla 4. *Temperaturas para el trabajo en caliente, fusión y homogeneización*, notamos algunos valores de fusión, temperatura de vaciado y temperatura de homogeneización de algunas aleaciones de aluminio.

Cuando las aleaciones son trabajadas en fríos, las aleaciones presentan endurecimiento, debido a que los granos de la estructura del aluminio han decrecido, lo cual, hace que este sea muy frágil, por lo tanto es llevado a un proceso de recocido y envejecimiento a temperaturas entre 350 a 450° C. Esta es una recristalización que aumenta el tamaño de grano. Pero se puede llegar al caso en que exista un crecimiento excesivo del grano lo cual influye en la aleación, haciendo que pierda cierta resistencia y surjan rugosidades superficiales.

Tabla 4. Temperaturas para el Trabajo en Caliente, Fusión y Homogeneización *

Designación de la aleación	Temperatura aproximada de fusión (° C)	Temperatura de Homogeneización (° C)	Temperatura inicial de trabajo en caliente (° C)
1080A	649-657		
1050A	646-657	560-600	480-550
1200	643-657		
1350			
2011	541-643	-	400-440
2014A	507-638	480-490	400-400
2024	502-638	480-490	400-440
2031	--	500	440-480
2117	554-649	500-530	440-480
2618A	560-649	500-530	440-480
3103	643-654	580-620	480-520
3105	629-654	530-550	
4043A	547-632	-	460-500
4047A	577-578	-	460-500
5005		530-550	440-480
5056A	632-654	380-420	400-420
5083	571-638	380-420	400-420
5154A	579-641	380-420	400-420
5251	593-643	500-560	480-520
5454	607-649	450-510	450-500
5554	602-646	450-510	450-500
5556A	-	380-420	400-420
6061	582-652		
6063	616-654		
6063A	616-654		
6082	-	560-600	430-500
6101A	621-654		
6463	616-654		
7010	-		
7020	-	400-440	390-420
7075	477-635		

* Fuente : King, Frank, El aluminio y sus aleaciones, Mexico, Limusa, 1992

El tratamiento térmico del aluminio se emplea para facilitar el proceso de fabricación de las formas comunes como hojas, laminas o después para regresar a su estado en donde las propiedades eran optimas y principalmente para aumentar su resistencia. Los tratamientos térmicos de los aluminios se dividen en dos tipos de aleación:

- aleaciones de endurecimiento por trabajo
- aleaciones tratables térmicamente

1.5.1 ALEACIONES DE ENDURECIMIENTO POR TRABAJO

Estas aleaciones aumentan sus resistencias por el aleaje y el trabajo en frío. Se les denomina a veces como aleaciones de endurecimiento por deformación. Este tratamiento involucra la deformación deliberada del metal a temperatura relativamente bajas en tanto que sirve para obtener un producto más fuerte. Una característica importante del trabajo en frío es que el metal se hace más difícil de deformar conforme la extensión de la deformación aumenta. La razón micromecánica básica de esto es que una dislocación impide el movimiento de otra dislocación, la cual hace del aluminio muy deformable o apto para el trabajo en frío, debido al gran numero de combinaciones de planos (red de átomos) y direcciones de alta densidad. Para llevar dicha aleación a poseer las propiedad originales esta es sometida a un proceso de recristalización, este consiste en el crecimiento de grano, es decir, se nuclean nuevos granos. Estos son libres de

Tensiones en las regiones de la micro-estructura con endurecimiento por deformación sometidos a una elevada tensión. Estos granos crecen al mismo tiempo hasta que llegan a ocupar toda la micro estructura. El tamaño de grano de la micro estructura de la recristalización disminuye con el grado de endurecimiento por deformación y por lo tanto, en este tratamiento hay una disminución de dureza en el recocido*(recristalización).

Estas aleaciones son calentadas a una temperatura que difiere para cada tipo de aleación como vemos en la tabla de temperatura de recocido (ver anexo B). Estos tratamientos se designan con la norma de la ASOCIATION FEDERAL ALUMINIUM , el cual se especifica el revenido con la letra H y acompañado de un numero , como 2,4,6,8 o 9 , el cual indica el grado de deformación o la dureza con que quedo durante la deformación o sea el mayor grado de deformación en frío aplicado al material. Hay otra condición de recocido totalmente blanda y se denota por la letra O y M (F en los Estado Unidos) e indica como el material se fabrico. Las aleaciones que son sometidas a endurecimiento por deformación son tres grupos; 1xxx, 3xxx, 5xxx. Remitiéndonos a la tabla 5. *Designación de la aleación endurecida por deformación*, se logra entender esta explicación.

Tabla 5. Designación de la Aleación Endurecida por Deformación

designación	Proceso	comentarios
F	como se fabrico	Productos de formas procesadas en el cual no hay control especial por encima de las condiciones térmicas o el trabajo de endurecimiento no es apropiado.
O	recosido blando	Productos forjados los cuales son recocidos para obtener la más baja intensidad de temperatura para fundir productos los cuales mejora la ductibilidad y la estabilidad dimensional.
H	endurecimiento por deformación material no tratable térmicamente	Estos productos incrementan su resistencia por trabajo de endurecimiento con o sin tratamientos suplementarios a producir alguna reducción en la resistencia. La H siempre es seguida por 2 o mas dígitos.
H1	Solo endurecido por deformación	El siguiente número de esta designación indica el grado de endurecimiento por trabajo.
H2	Endurecimiento por deformación y recocido aparte	Se logro el revenido por deformación en una cantidad mayor a la requerida y después se sometió al material aun tratamiento parcial.
H3	Endurecimiento por deformación y estabilización	Indica que después del trabajo en frío las propiedades se estabilizan mediante un tratamiento a temperatura baja. El resultado del tratamiento de estabilización es el de disminuir ligeramente las propiedad mecánicas y aumentar la ductibilidad.
H12,H22,H33	Un cuarto de dureza	
H14,H24,H34,	Semiduro	
H16,H26,H36	3 cuartos de dureza	
H18,H28,H38	Totalmente duro	

1.5.2. ALEACIONES TRATABLES TERMICAMENTE

Estas pertenecen a los grupos 2xxx, 6xxx, 7xxx. El tratamiento térmico de estas aleaciones se da por intermedio de un REFORZAMIENTO POR PRECIPITACION y crea en el material una dispersión fina o densa de partículas en la red cristalográfica del material. Estas partículas contribuyen a que el movimiento de las dislocaciones existentes en la red cristalográfica se vean obstaculizados y por ende refuerzan el material, endureciéndolo. Por tal motivo este tratamiento térmico por reforzamiento por precipitación del aluminio y sus aleaciones también sea llamado, endurecimiento. Este tratamiento en el aluminio comprende tres etapas:

1. El tratamiento térmico de la solución
2. Temple
3. Envejecimiento

El tratamiento térmico de la solución es también llamado "SOLUBILIZACION" y consiste en calentar el material en hornos de circulación forzada y luego sumergirse en un medio refrigerante, para obtener una estructura uniforme del aluminio. El cual presenta vacíos, red de vacíos, dislocaciones y otros defectos estructurales antes de someterla a la solubilización.

El enfriamiento rápido llamado TEMPLE, es la segunda etapa del proceso de reforzamiento de precipitación. Consiste en sumergir la muestra en un medio que normalmente es agua a temperatura ambiente. Este temple deja a la estructura en una solución sólida supersaturada en el cual los granos de la estructura, lo cual deja a los átomos queden en un menor tamaño e inestables. Esto Posibilita la auto difusión por toda la red cristalina de los mismos. Quedando los átomos en un estado de alta energía imposibilitando el material a un posterior trabajo en frío o de deformación en la vida de uso del material, ya que presenta mucha fragilidad. A continuación interviene la tercera etapa llamada "ENVEJECIMIENTO", o llamada por otros autores envejecido y es la última etapa del proceso de reforzamiento por precipitación. Este ayuda a la solución sólida supersaturada a buscar un estado de equilibrio (tamaño de grano mas grande que en el proceso del temple), logrando un empaquetamiento mucho mas uniforme y fino en los átomos de la solución sólida del aluminio. Este envejecimiento puede ser natural, cuando es sometido a temperatura ambiente y envejecimiento artificial cuando se somete a elevadas temperaturas en hornos de circulación forzada u otros tipos de hornos. Estas aleaciones son especificadas en Europa y Estados unidos por medio de la letra T, el cual explicamos en la Tabla 6. Designación de la aleación bajo el tratamiento térmico.

Tabla 6. Designación de la Aleación Bajo el Tratamiento Térmico

designación	Proceso	comentario
T	Térmicamente tratable produce propiedades estables como F. O, o H .	Enfriada desde un proceso de conformación a una temperatura elevada y envejecida en forma natural hasta una condición sustancialmente estable y trabajada en frío.
T2		
T3	Solución tratada , templada y trabajada en frío y envejecida hasta una condición sustancialmente estable	Estos productos son trabajados en frío antes de la solución tratada y el efecto de los trabajos en frío y conocer los límites de las propiedades mecánicas
T4	Solución tratada, templada y envejecida hasta una condición sustancialmente estable	Estos productos tampoco son trabajados en frío antes de la solución tratada de alta o es trabajada en frío y los efectos del trabajo en frío pueden no ser reconocidos
T5	Templada para una elevada temperatura de procesos de formas y artificialmente envejecida	
T6	Solución tratada de alta , templada y envejecida artificialmente	Estos productos tampoco son trabajados en frío antes de la solución tratada de alta o es trabajada en frío y los efectos del trabajo en frío pueden no ser reconocidos
T7	Solución tratada, templada y estabilizada	Estos productos forjados para llevarlos más allá a un punto de máxima resistencia para proveer control de algunas características usualmente resistencia a la corrosión.
T8	Solución tratada , templada, trabajada en frío y envejecida artificialmente	Estos productos son trabajados en frío después de la solución tratada y los efectos del trabajo en frío es reconocer los límites de las propiedades mecánicas
T9	Solución tratada , templada, trabajada en frío y envejecida artificialmente	Estos productos son trabajados en frío para aumentar la resistencia.

2. FACTORES QUE AFECTAN LA SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio y sus aleaciones pueden ser unidos por una gran variedad de métodos, incluyendo soldadura por fusión y resistencia, soldadura fuerte, soldadura blanda, adhesivos, y métodos mecánicos tales como remachado y atornillado. Los factores que afectan la soldadura para el aluminio y sus aleaciones son muchos, pero los más esenciales y más importantes son las que se definen a continuación.

2.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Es la propiedad física que más afecta la soldabilidad de las aleaciones de aluminio. La conductividad térmica de las aleaciones de aluminio son de alrededor de 1 ½ mas alta que la del cobre y cuatro veces mas que la de los aceros. Esto significa que en el aluminio el calor se propaga cuatro veces mas rápido que en el acero para la misma cantidad de calor aplicado en la muestra.

2.2 COEFICIENTE LINEAL DE EXPANSIÓN TÉRMICA

Lo cual es una medida del cambio de longitud o de dimensiones en un material

con un cambio en su temperatura, y esta es otra propiedad física que afecta la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones. El coeficiente lineal de expansión térmica para el aluminio es 2 veces la del acero. Esto significa un cuidado extra que deberá ser tomado en la soldadura de aluminio para asegurar que el espacio de la junta quede uniforme y no se contraiga o se defleccione demasiado durante el proceso de soldadura y debe ser prioritario conocer estos valores de coeficiente de conductividad y de expansión térmica para asegurar la soldadura y evitar así, posibles fallas (Vease el anexo E.)

2.3 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Tiene una pequeña influencia en la soldadura por fusión pero es una propiedad muy importante que se presenta en la soldadura por resistencia. En soldadura por resistencia, se basa en el paso de una corriente eléctrica a través del metal (resistencia eléctrica), lo cual es muy alto y como sabemos produce una alta temperatura en el metal, lo cual lo lleva a fundirse y afecta a este tipo de soldadura debido a la poca resistencia del aluminio, se necesita de mucha mas energía para fundir el metal y menos tiempo de presión comparándola con la soldadura de resistencia de los aceros (Vease el anexo F, pagina.)

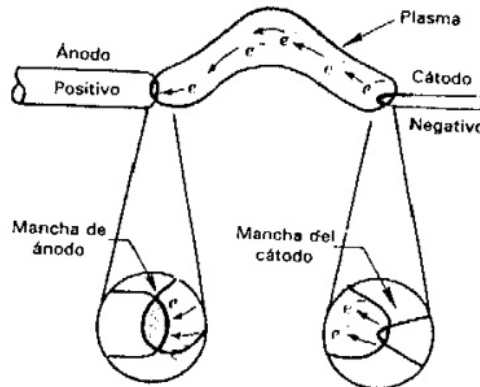
2.4 CAPA DE OXIDO DE ALUMINIO

La capa de oxido se forma inmediatamente en el aluminio apenas este se exponga al aire. Esta capa esta formada de alumina, descrita anteriormente en el capitulo1, del presente trabajo. Esta capa es muy resistente a el calor, y comparándola con la capa de oxido del acero, se llega a la conclusión que ese necesita mas energía para lograr quitar dicha capa empleando para ambos materiales el mismo proceso de soldadura. Si la capa no es removida del aluminio, esta interviene en cordón de soldadura y actúa como impureza, logrando así, las fallas comunes para este tipo de inclusiones, como son, agrietamientos en el cordón y fallas por fatiga del metal.

Los procesos de soldadura que mejor combaten este tipo de defectos, son los de arco de electrodo metálico (MIG y gas de protección y electrodo de tungsteno y gas de protección (TIG), y que se explican a continuación.

Un electrodo de tungsteno puede ser positivo o negativo, dependiendo de la forma como se conecta el arco a la fuente de poder. Cuando los electrones, introducen la corriente al sistema, bombardean al electrodo. Al entrar a la superficie del electrodo de tungsteno y desacelerarse, los electrones chocan contra los átomos que se encuentran a su paso y ceden parte de la energía llevan. El calor se empieza a acumular y el tungsteno se funde.

Figura 8. El Arco Voltaico



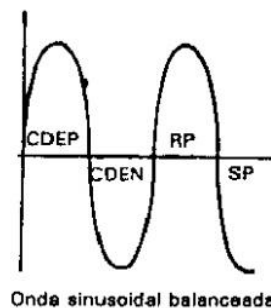
Fuente: Koellhoffer, Leonord, Manual de soldadura, México, Limusa, 2001,301 p.

Cuando el electrodo de tungsteno se conecta a la terminal negativa sucede lo contrario (ver figura 6). Los electrones abandonan el tungsteno y fluyen a través del arco hacia la pieza. Los electrones absorben la energía del electrodo, por lo que este se enfría. Si el tungsteno se conecta con polariza directa (electrodo negativo), se necesita mas calor para fundir el metal. La diferencia que existe entre ambas polaridades en su capacidad para hacer circular la corriente, es muy grande. El efecto refrigerante que tienen los electrones crece al aumentar su disponibilidad. Conforme que sea más fácil que los electrodos dejen la punta del electrodo de tungsteno, mas rápido se va a enfriar esta pieza y mayor será la intensidad de la corriente que circule a través de ella antes de fundirse.

La soldadura con corriente alterna combina los resultados de ambas polaridades. La capacidad de conducción de corriente se sitúa entre la de la

polaridad directa (electrodo en negativo) y la de la polaridad inversa (electrodo en positivo). La capacidad real de conducción de corriente depende de la razón que existe entre la CDEP y CDEN (CDEP significa polaridad invertida con corriente directa y CDEN polaridad directa con corriente directa respectivamente).

Figura 9. Forma Común de la Corriente Alterna



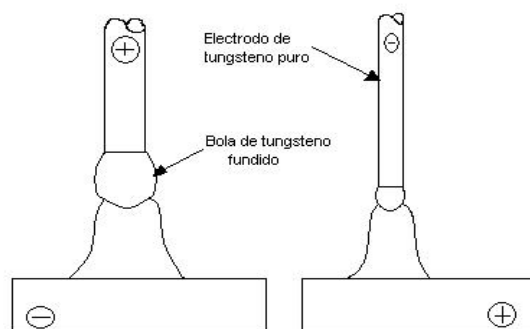
Fuente: Koellhoffer, Leonord, Manual de soldadura, México, Limusa, 2001,301 p

Cuando se emplea corriente alterna de onda balanceada, es decir, cuando ambas polaridades tienen la misma corriente promedio, la capacidad es menor a la que se obtiene con la corriente alterna convencional. No hay forma de ajustar la razón de las corrientes en las fuentes de poder convencionales de CA. La tendencia natural de los electrones a mantener frío el electrodo, también provoca que el arco funcione más tiempo en la movilidad de polaridad directa. La corriente alterna se desbalancea más en la dirección de mayor polaridad directa que en la polaridad inversa. Las fuentes de poder que se utilizan en soldadura tienen que

diseñarse para adaptarse a este desbalance natural que existe en la corriente. Es necesario tener presente que aunque los electrodos de tungsteno son elementos muy simples, la influencia que tienen en el funcionamiento del arco es muy grande. Si se manejan con cuidado y precisión, el arco funcionara con resultados muy satisfactorios.

En la polaridad inversa (electrodo en positivo), es necesario reducir bastante la corriente del arco. En polaridad inversa, los electrones no sólo mantienen frío el tungsteno, sino que conducen más calor hacia la punta.

Figura 10. Arco del tungsteno.



En ocasiones, salvo por la diferencia en las corrientes, es difícil distinguir los arcos de CDEN de los de CDEP.(Vease la figura 10) Sin embargo, es muy difícil diferenciar las polaridades cuando se suelda aluminio. Este metal presente sobre su superficie una capa de oxido y se puede observar como se lleva a cabo la acción de limpieza. Se ven puntos brillantes que se mueven y brincan a lo largo

del borde del charco, sobre la pieza de trabajo. Estos puntos son las manchas del cátodo. La corriente del arco circula a través de estos puntos, razón por la cual se calienta mucho. Una de las teorías que intentan explicar el fenómeno de la acción limpiadora establece que el calor vaporiza una fracción del aluminio que se encuentra debajo de la capa de óxido. El vapor se expande y hace que la capa de óxido explote. Las películas tomadas a gran velocidad muestran que ese proceso se lleva a cabo en cada una de las manchas del acatado con tanta rapidez, que no es posible percibirlo a simple vista. Una vez que la capa de óxido ha sido eliminada del sitio, el arco se desplaza a otro lugar en donde hay más óxido; se ve como si las manchas o puntos se estuvieran moviendo de un lado al otro sobre la superficie del aluminio. El arco tiende a buscar más óxido y se extiende si es que no lo hay cerca.

Según la teoría, la acción del arco se debe simplemente al bombardeo del metal con portadores de cargas eléctricas que se encuentran en el plasma del arco. Cualquiera que sea la teoría correcta, el resultado es que el arco elimina la capa de óxido.

Sin embargo, existe un problema con esta acción de limpieza y es que solo se produce con CDEP, es que la corriente de tungsteno es muy baja, por lo tanto es mejor soldar aluminio con corriente alterna.

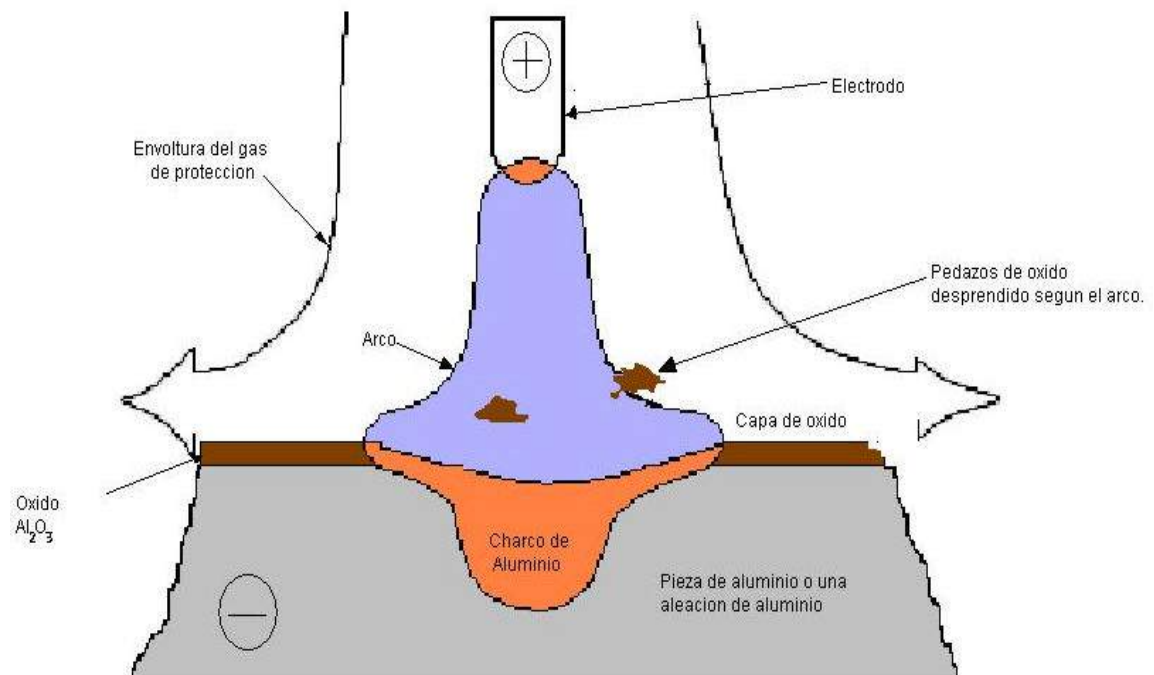
En la lección pasada se explicó brevemente el efecto limpiador del arco de electrodo de tungsteno. Este efecto consiste en quitar el óxido que se forma en la superficie del metal por soldar. La limpieza constituye un factor muy importante en la soldadura de aluminios, porque normalmente este metal está cubierto de una capa delgada de óxido. El óxido aparece casi inmediatamente después de haber limpiado la superficie del aluminio. El metal reacciona con el oxígeno del aire y forma el óxido de aluminio, que es una especie de envoltura de protección.

El óxido actúa como una barrera que impide que el aire se ponga en contacto con el resto del aluminio. Es la capa de óxido la que hace que el aluminio resista todo tipo de climas. Sin embargo, obstaculiza la labor de la soldadura. Esta capa de óxido en el aluminio se conoce como óxido refractario, lo que quiere decir que no funde ni se vaporiza a temperaturas elevadas. Químicamente es muy ácido en la alumina, que es un óxido de aluminio que se usa para hacer boquillas que se emplean para guiar el gas inerte de protección del proceso. La alumina también se utiliza en cerámica y revestimientos para hornos. Es casi imposible que el aluminio permanezca sin la capa de óxido.

No es posible soldar adecuadamente el aluminio y sus aleaciones, si no se elimina antes la capa de óxido que posee. Esta capa se hace más gruesa a medida que transcurre el tiempo. Sin embargo, el óxido deja de formarse cuando el aire ya no puede penetrar hasta donde se encuentra el aluminio. A medida que pasa el tiempo, se vuelve más difícil desoldar. Lo mejor es limpiar el aluminio

inmediatamente antes de empezar a soldar. No se debe dejar que transcurran más de unas cuantas horas. Mientras mas tiempo pase, mas gruesa será la capa de oxido y mas difícil de trabajar. Como se señalo en la sección pasada, si se emplea polaridad invertida (electrodo positivo), el arco elimina la capa de oxido. (Vease la figura 11) Pero, como los electrodos de tungsteno tienen un rendimiento de corriente bajo cuando se utiliza polaridad CDEP, la mayoría de las aleaciones de aluminio se sueldan con corriente alterna. Como se indico antes, parte del ciclo en el cual el electrodo es positivo, se utiliza para quitar la capa de oxido, y la parte en el que el electrodo es negativo se emplea para soldar.

Figura 11. Limpieza del Oxido por el Arco Eléctrico



Fuente: Koellhoffer, Leonord, Manual de soldadura, México, Limusa, 2001,301 p

Pero cuando se utiliza la corriente alterna por la capacidad que tiene para limpiar el óxido, surge otro problema. La capa de óxido actúa como aislante eléctrico y dificulta la reignición del arco cuando la corriente pasa por el valor cero. Hay dos formas de solucionar el problema. Una de ellas consiste en utilizar una fuente de poder con una tensión de circuito abierto muy elevada, que normalmente es de 150 voltios. La otra manera es dar al suministro de energía una ayuda adicional. Los aparatos de HF (high frequency) son dispositivos que se utilizan mucho para darle al arco la energía necesaria para que encienda, pero no constituye la única forma de hacerlo.

Para el método MIG la polaridad es CDEP, utiliza el mismo principio que el explicado anteriormente, debido a que limpia al aluminio de la capa de óxido presente en su superficie. No se utiliza corriente alterna y CDEN por que gasta demasiada energía para fundir el metal de aporte y muy poca la de la pieza.

Si solo van a producirse unas cuantas piezas, el fabricante por lo general trata de usar equipo existente. La producción en grandes cantidades podrá justificar la adquisición de nuevo equipo. Los pequeños talleres que reciben de vez en cuando un encargo para soldar aluminio, frecuentemente lo sueldan con acetileno o arco metálico, en vez de invertir capital en conjuntos para soldadura con gas inerte empleando electrodos de alambre de aluminio o tungsteno. Los fabricantes que cuentan con equipo manual de soldar con gas inerte y electrodo de alambre de

aluminio frecuentemente sueldan grandes encargos repetidos sin hacer mayores inversiones, mientras que las empresas que realizan trabajos extensivos, pueden abandonar tales conjuntos a favor de equipo mas automatizado.

3. SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio y sus aleaciones es uno de los materiales más versátiles del mercado, posee un peso ligero y es resistente. Su presentación es muy higiénica, puede ser maquinado, formado, y extruido. Además puede ser pintado para una mejor presentación y no es combustible. No es toxico, tiene una conductividad eléctrica buena, tiene alta rata de transferencia de calor y aparte de las características antes mencionadas, también puede ser *soldado*.

3.1 PRINCIPALES PROCESOS DE SOLDADURA POR FUSIÓN PARA EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

En la siguiente tabla mostramos los procesos principales de soldadura por fusión y sus aplicaciones típicas.

Tabla 7. Procesos de Soldadura del Aluminio por Fusión

PROCESO	APLICACIONES TÍPICAS	COMENTARIOS
Soldadura por fusión		
TIG	Barril de cerveza, recipientes de presión. Láminas y planchas de espesores delgado.	Todas las posiciones de soldeo, manual o totalmente automático.

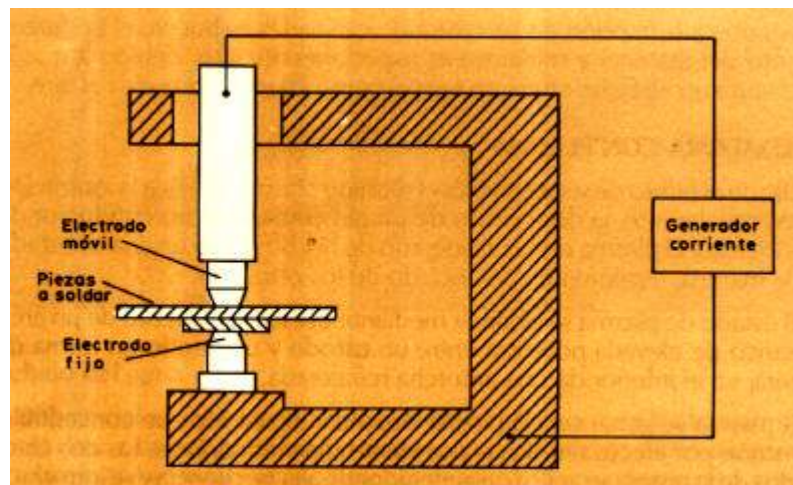
MIG	Construcción de barcos, aviones, trenes tanques de almacenamiento, recipientes de gas, tubería de diámetro grande.	Calidad alta. Todas las posiciones, tipo manual o totalmente automática.
electrogas	Tanques de almacenamientos grandes	Aplicación limitada
Electroslag	Equipos electrónicos y eléctricos	Posición vertical, solamente
Arco sumergido	Eléctrica y electrónica, bus-bars	Solamente posición horizontal
Electrodo revestido	Aplicaciones para baja resistencia,	Decorativos, no estructurales
Oxiacetilénica	decorativa	Para trabajos de baja calidad
Haz de electrones	Equipos electrónicos, micro-soldadura ,equipos aéreo-espaciales de alta tecnología	Alto costo de producción
láser	Micro-soldadura de precisión para equipos electrónicos	Alto costo de producción
Soldadura por resistencia		
Por punto	Trabajo en laminas, automóviles, aparatos domésticos	Alto costo de producción
Por costura o continua	Trabajo en laminas , automóviles, aviones, aparatos domésticos	

3.1.1. Soldadura Por Resistencia

Es usado para la soldadura de las aleaciones de aluminio, no solamente para aquellas aleaciones que no sean endurecidas por tratamiento térmico, sino también para los tipos especiales (como las clases 2XXX, 7XXX) endurecidas por tratamiento térmico, o más precisamente a través de la solubilización y envejecido. De hecho la soldadura por resistencia es casi el único proceso recomendado para estas clases de aleaciones, por que su influencia es local y no degrada las propiedades del material. Cualquier otro proceso de fusión causaría pérdidas de resistencia a la corrosión, dureza y resistencia. Sin embargo, algunos procesos especiales que afectan la soldadura del aluminio y sus aleaciones

deben ser consideradas como son, un alto coeficiente de conductividad eléctrica y térmico (mas alto que el acero de bajo carbono), estas dos propiedades combinadas exigen un amperaje alto en la aplicación de la soldadura en un tiempo mas corto. Una temperatura de ablandamiento mas baja y de fusión; una menor resistencia (comparando con el acero); la presencia de una película de oxido de aluminio en la superficie del material, produce una usual resistencia a la corrosión pero impide la soldadura del aluminio si no es removido. Todos esto propone un desafío que debe ser especialmente manejado y en donde el empleo de códigos de construcción y de soldadura para el aluminio y sus aleaciones es de mejor ayuda.

Figura 12. Soldadura por Resistencia



Estas características influyen en la selección de parámetros para la soldadura por

Resistencia. En consecuencia el proceso de control es muy importante y los equipos deben ser precisos. La limpieza y la preparación de la superficie a soldar son esencialmente necesarias para obtener buenos resultados.

No todos los aluminios y aleaciones de aluminio están en condiciones de soldarse con la misma facilidad, en particular las aleaciones suaves (condición de recocido).

3.1.2. Soldadura a Gas con Oxiacetileno

La soldadura a gas con oxiacetileno pertenece al primer grupo. Antes de proceder a soldar se tiene que quitar toda la mugre y grasa con un disolvente y cepillar con un cepillo de alambre de acero inoxidable. Para deshacerse del óxido sobre la pieza de trabajo y la varilla de metal de aportación, se utilizan fundentes, que tienen una acción tanto física como química. Estos fundentes tienen como componentes principales a fluoruros y cloruros alcalinos. La temperatura de fusión del fundente debe ser inferior a la de cualquier eutéctico presente en el producto que se suelda y debe tener un potente efecto de aglomeración sobre las pequeñas gotas de metal y absorber los óxidos con rapidez principalmente para efectos de tensión superficial. Su fluidez debe ser alta de manera que pronto flote en la superficie del depósito de metal fundido. Después de soldar, es preciso eliminar al fundente mediante agua caliente y lavar para evitar la corrosión durante el

servicio.

Las varillas de metal de aportación casi siempre son de la misma aleación que la pieza que se trabaja, aunque quizás lleven de un 5 a un 10% de una aleación de silicio. Están recubiertas de un fundente que debe estar seco para evitar que entren hidrógeno y oxígeno dentro del metal fundido de la soldadura.

La soldadura de los vaciados se puede efectuar con la misma facilidad que la soldadura de hojas y placas de aluminio puro. Sin embargo, puesto que los vaciados son menos dúctiles que las hojas, es de considerarse un precalentamiento de todos los vaciados o al menos una parte, seguido de un enfriamiento lento después de soldar. En el caso de las hojas y las secciones se necesita tomar precauciones para eliminar efectos de dilatación y contracción.

Es esencial contar con operadores hábiles para soldar a gas con oxígeno el aluminio; esto se emplea en la actualidad para trabajos de reparación.

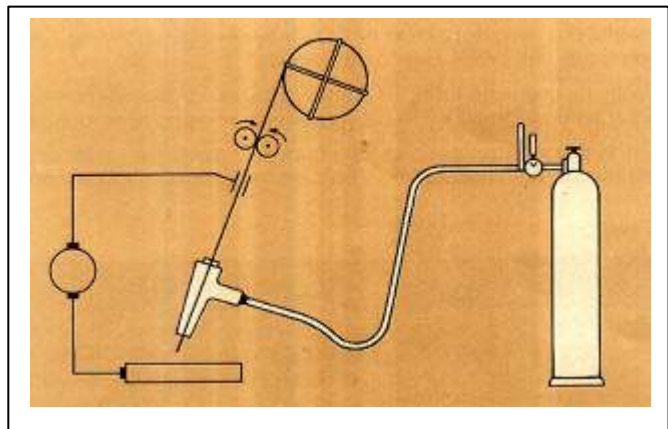
Las aleaciones tratadas térmicamente, en especial las de la serie 2XXX, no son adecuadas para unirse mediante la soldadura de oxiacetileno, debido a la pérdida de resistencia y al riesgo de agrietamiento.

3.1.3 Soldadura por Arco Eléctrico con un Gas Inerte, (TIG y MIG)

En los procesos de soldadura de tungsteno con gas inerte y de metal con gas inerte, una corriente de argón seco (99.5% puro) protege el metal base, el aluminio, para que no reaccione con oxígeno, nitrógeno o hidrógeno atmosféricos. El argón se alimenta a través de un anillo que rodea el electrodo y el arco eléctrico se mantiene dentro de esta protección entre la punta del electrodo y la pieza que se trabaja (Ver figura 8 y 9). Los fundentes son innecesarios debido a que cualquier óxido presente en la superficie se elimina por emisión termiónica a partir de las superficies de las piezas de trabajo de aluminio. En el proceso de electrodo de tungsteno con gas inerte, un electrodo, que también puede ser tungsteno-circonio se usa con una fuente eléctrica de corriente alterna en vez de corriente directa. Esto se hace porque la acción del arco eléctrico al eliminar la película de óxido de la pieza de trabajo depende de la emisión de electrones procedentes de la superficie cuando se conecta al polo negativo. Cuando el tungsteno está en el positivo, se calienta con rapidez mediante los electrones que vienen del aluminio, con el resultado de que el arco eléctrico es inestable además de dificultarse el control del depósito de la soldadura. Con un suministro de corriente alterna la pieza de trabajo se calienta en forma apropiada en el medio ciclo positivo del aluminio y el óxido se elimina satisfactoriamente durante el medio ciclo positivo del tungsteno. A menudo se sobrepone un impulso de alta frecuencia auxiliar para mantener de modo óptico el arco eléctrico, en especial durante el arranque. El

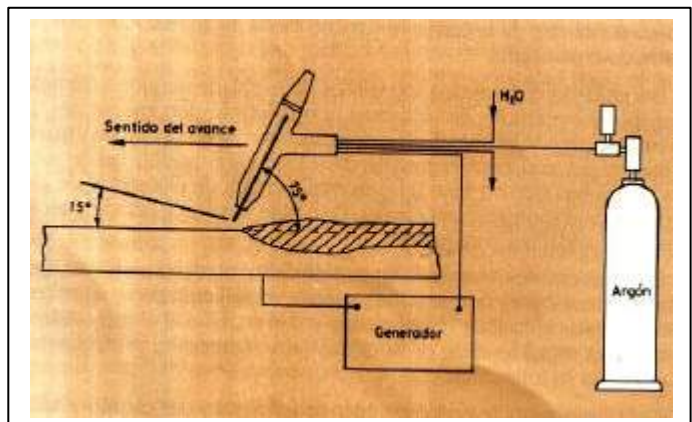
metal de aporte se añade mediante una varilla con la composición adecuada fundida en el arco eléctrico, en especial durante el arranque. El metal de aporte se añade mediante una varilla con la composición adecuada fundida en el arco eléctrico a medida que se mueve. Para un material con menos de un espesor de unos 6.5 mm no se necesita biselar los bordes antes de soldar, ya que la penetración del arco eléctrico es suficiente sin dicho tratamiento, aunque por encima de este espesor debe ser biselado. No obstante, se prefiere el proceso con electrodo de metal con gas inerte para el material de mayor espesor.

Figura 13. Proceso MIG.



Sola, Pere Molera, Soldadura Industrial: Clases y Aplicaciones, Marcombo, España, 1992. 90 p.

Figura 14. Proceso TIG.



Sola, Pere Molera, Soldadura Industrial: Clases y Aplicaciones, Marcombo, España, 1992. 90 p.

Cuando el electrodo del tungsteno se sustituye por un alambre de metal de aporte, el arco eléctrico se establece entre la punta del alambre y la pieza que se trabaja con el alambre positivo debido a que se funde con prontitud. La pieza que se trabaja es negativa y se conserva limpia. El proceso de metal con gas inerte de electrodo consumible ofrece muchas ventajas inherentes que incluyen soldaduras limpias, estabilidad del arco eléctrico (suministro de corriente directa), completa visibilidad, altas velocidades de soldadura o depósito, las cuales reducen la distorsión y mejoran la eficiencia, poco o ningún retoque, alteraciones mínimas de las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión y esfuerzos residuales reducidos (que promueven un mejor comportamiento de la corrosión por esfuerzo). Los materiales con un espesor menor de 3 mm se sueldan, por lo general, mediante el proceso de electrodo de tungsteno con gas inerte, pero el proceso de electrodo de metal con gas inerte de “arco eléctrico corto” con un alambre de 0.5 mm de diámetro es adecuado para soldar hojas de 1 a 6 mm de espesor. El proceso de metal con gas inerte automatiza con facilidad para trabajos repetitivos. No se recomienda la soldadura por arco eléctrico con argón para las aleaciones de la serie 2XXX en la condición de tratamiento térmico. El metal para soldaduras de vaciados tiene bajas propiedades las cuales no se recuperan mediante un trabajo posterior. Una soldadura trabajada por martillado, seguida por tratamiento térmico está sujeta a cambios estructurales que incluyen la coagulación de las partículas CuAl_2 , acompañado por una drástica reducción de las propiedades y la formación de eutécticos locales perjudiciales que no se pueden volver a disolver con un

Tratamiento térmico posterior. En la soldadura de las aleaciones de Al-Mg de la serie 5XXX, no es conveniente utilizar una aleación de aporte de silicio y se recomienda el material de aporte de Al-Mg. El contenido de magnesio de las varillas de metal de aporte debe ser mayor que la aleación inicial para reducir el riesgo del agrietamiento, pero quizás exista una cierta susceptibilidad a la corrosión intergranular debido a la presencia de partículas β si la pieza que se trabaja se calienta por largos periodos a temperaturas de 70-200 °C. El contenido de sodio de las varillas de metal de aporte de Al-Mg se debe mantener a un nivel muy bajo para reducir el riesgo de gasificación y agrietamiento.

Las aleaciones de las series 6XXX de Al-Mg-Si, se sueldan de la misma manera que las aleaciones de Al-Mg, por lo que se utiliza a menudo una aleación de relleno de Al-Mg. También se puede soldar con soldadura dura de bronce con varillas de metal de aporte con un 5 a 10% de silicio, pero es básico considerar el posible efecto perjudicial del Mg_2Si que se forma en cantidades excesivas.

Las aleaciones tratadas térmicamente del tipo 7XXX y en particular las que tienen altos contenidos de zinc del orden de 5-7 %, no son adecuadas para soldadura por arco eléctrico. Las aleaciones de esta serie que tienen contenidos más bajos de zinc como la AZAG (2.75-3.5 % de zinc, 1.5-2 % de magnesio, 0.2-0.7 % de manganeso, ó 0.1-0.4 % de cromo) pueden soldarse (electrodo de tungsteno) con metal de aporte de la misma composición de la aleación y esto se debe a que el

Depósito vaciado se enfría lo bastante rápido para generar propiedades inmediatas al envejecer a temperatura ambiente.

3.1.4 Soldadura Blanda

La soldadura blanda consiste, principalmente, en la aportación de aleaciones (soldantes) de estaño y de plomo, cuyo punto de fusión depende de las proporciones relativas de estos dos metales en aleación. Con la proporción de un 62 % de estaño se obtiene una “soldadura fina”, que se emplea cuando las exigencias son críticas con respecto a la temperatura. Por el contrario, la amplia zona de solidificación de la aleación, que contiene un 35 %, permite dejar “limpia” la unión. La soldadura blanda requiere una limpieza previa de las superficies a soldar para eliminar la capa de óxido, que dificulta la unión del material de aporte y el metal base.

La soldadura de estaño-plomo se expone en forma de lámina o cinta de varios espesores y anchuras o alambres de distintos diámetros y polvo de varias mallas. Los polvos de soldar se usan, principalmente, para las piezas pequeñas y delicadas; tal es el caso de la joyería. Aunque no se recomienda la soldadura blanda para unir el aluminio, pues para ello se prefiere la soldadura fuerte y la simple soldadura.

En la soldadura blanda de metales ligeros. Limitada exclusivamente a la unión del aluminio y sus aleaciones, puede emplearse únicamente para chapas muy delgadas, de menos de 0.2 mm de espesor en lo que se refiere a la soldadura por medio de soldador. Prescindiendo de ello, para este tipo de soldadura solo puede emplearse la llama Bunsen o la soldante para soldar todos los materiales a base de aluminio. Como la temperatura de trabajo para el proceso esta comprendida entre 180 y 500 °C, los datos relativos a la soldadura autógena (oxiacetilénica) son validos igualmente para la soldadura blanda en cuanto al descenso o disminución de resistencia de aleaciones de aluminio templadas.

Las varillas para la soldadura blanda de aluminio son especialmente de metales pesados a base de zinc y estaño con adiciones de plomo, cadmio, bismuto, etc., y contienen únicamente hasta 30%, a lo sumo, de aluminio, pero por regla general esta cantidad no pasa de 15 %. A continuación se muestra en un ejemplo la aleación para la soldadura blanda.

Tabla 8. Soldadura blanda

Composición aproximada	Intervalo de fusión, ° C	Observaciones y usos
40 % de Zn de 60% de Sn	330	Para la soldadura blanda de aluminio

3.1.5. Soldadura Dura

En la soldadura dura, si bien es análoga a la soldadura blanda, si bien utilizan aleaciones que funden a temperaturas mas elevadas y es mas fuerte la unión, la soldadura funde y fluye por las fuerzas capilares entre las superficies contiguas o superpuestas de las partes que se desean unir, que se han calentado, aunque sin llegara a fundir. Los materiales de soldadura mas corrientes empleados son, la plata (pura o aleada), latón, cobre y bronce. Estos metales tienen distintos puntos de fusión y producen uniones de resistencia de tracción variable.

La elección de la mejor aleación de soldadura depende de muy distintos factores, estas soldaduras de clasifican en tres grupos:

- 1) Aleaciones de plata o plata pura, con puntos de fusión de 650 a 870° C.
- 2) latones y aleaciones de níquel-plata, que funden de 870 a 930° C.
- 3) cobre y aleaciones de cobre, cuyos puntos de fusión se encuentran entre 870 y 1120° C.

En contraposición a la soldadura blanda de aluminio, las soldaduras duras tiene una proporción considerablemente mayor de aluminio, de 70 a 90 %. Los demás componentes de la aleación, generalmente metálicos, de las varillas de soldadura dura, como cobre, cinc, estaño, plata, níquel, manganeso, cadmio, silicio, antimonio, bismuto, etc., están representados en cantidades mucho mas

pequeñas que en la soldadura blanda, con lo que resulta de un aumento considerable de la temperatura de fusión y consiguientemente de la de trabajo.

Una soldadura dura muy preferida es también el alambre de silumín con 13 % de silicio y el resto aluminio.

3.2. METALES DE APORTE PARA ALEACIONES DE ALUMINIO

Al aluminio se le aplican en gran medida las soldaduras por los procesos de arco metálico y gas, arco de tungsteno y gas. A causa de la operabilidad relativamente deficiente, y la necesidad de la completa eliminación del fundente después de aplicada la soldadura, raras veces se emplean varillas de aporte recubiertas para soldar el aluminio. Los metales de aporte que se han encontrado adecuados para la soldadura de arco de uso general, con diversas combinaciones de aleaciones de aluminio, aparecen en el anexo C.

Los tamaños normales de electrodos desnudos de soldadura de aluminio que se venden en carretes, son 0.0030, 3/64, 1/16, 1/32 y 1/8 de pulgada. Estos se obtienen en carretes de 10, 12 1/2, y 15 libras. Los alambres de diámetros hasta 1/16 de pulgada se obtienen también en carretes de una libra.

Las varillas desnudas de soldadura en tramos rectos en espiras se surten en

Diámetros de 1/16, 3/32, 1/8, 5/32, 3/16, 1/4 de pulgada. La varilla de aluminio de longitud estándar es de 36 pulgadas, y el paquete mas común contiene cinco libras. Se obtienen otras longitudes y tamaños de paquetes, los cuales se describen en la especificación AWS A5.10-69.

Los electrodos de aluminio recubiertos que se usan para soldadura de aluminio con arco son ya sea de 14 pulgadas de largo, con diámetros de 3/32, 1/8, 5/32, 3/16, y 1/4 de pulgadas; o bien, de 18 pulgadas de largo, en diámetros de 5/16y 3/8 de pulgadas. Los paquetes normales contienen una, cinco o diez libras, y en esta forma se expende en el comercio.

3.3 PROBLEMAS PRÁCTICOS EN LA SOLDADURA DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

En la practica de la soldadura del aluminio nos encontramos con muchos problemas, tales como, alimentabilidad, que se refiere a la forma de depositar el material de aporte y muchos otros como: porosidad, agrietamiento y selección de aleación de relleno que se explicaran a continuación y fueron escogidos por que son los que mas influyen en la soldadura del aluminio.

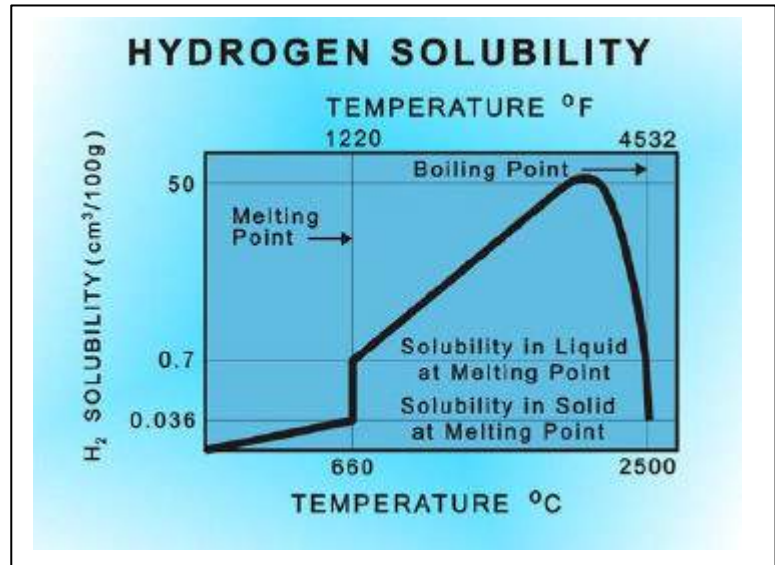
➤ Porosidad

La porosidad es resultado del gas hidrógeno, que es atrapado en la soldadura al

Solidificar el aluminio durante la misma. El hidrógeno es muy soluble en el aluminio fundido (como vemos en la Fig. 5) y por esta razón, existe la posibilidad que cuando se proceda a soldar el material este se vea afectado por el hidrógeno. Puede introducirse hidrogeno involuntariamente durante la operación de soldadura a través de contaminantes dentro del área de la soldadura como hidrocarburos y/o humedad. Pueden encontrarse hidrocarburos en la pieza el alambre de soldadura que se ha contaminado como por ejemplo: lubricantes, grasas, o pintura. Es importante entender los métodos adecuados para la efectiva remoción de estos hidrocarburos e incorporar los métodos apropiados en el procedimiento de soldadura. La humedad (H₂O) contiene hidrógeno y puede penetrar en el área de la soldadura a través de fugas de agua dentro del equipo de soldadura provenientes del sistema de refrigeración, inadecuada pureza del gas protector, la existencia de condensación en la pieza o en el alambre de soldadura debida ala alta humedad o que la pieza este por debajo de la temperatura del punto de rocío del vapor agua (pieza mas fría que el ambiente) o que este presente en la pieza un oxido de aluminio hidratado.

Figura 15. Difusión del Hidrógeno*

- *Melting point*: punto de fusión.
- *Boiling point*: punto de ebullición.



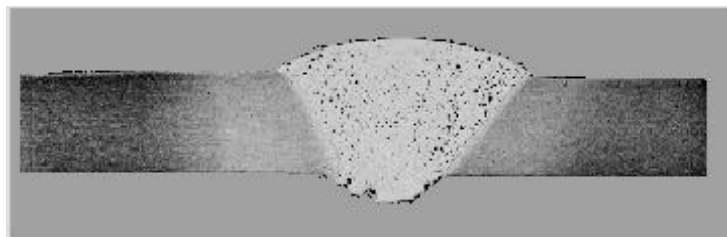
* <http://www.alcotec.com>

Aluminio tiene una capa de óxido protectora. Esta capa es relativamente delgada y natural y es creada inmediatamente en el aluminio al exponerse este a la presencia de oxígeno (medio ambiente). El aluminio correctamente guardado, y protegido, puede soldarse fácilmente con el proceso de gas inerte (MIG Y TIG), procesos de soldadura que deshacen y remueven el óxido durante la soldadura. La capa de óxido de aluminio es porosa y tiende a absorber humedad, crecer en espesor, y convertirse en un problema mayor cuando se procede a la soldadura. Cuando se proyectan procedimientos de soldadura, se piensa en reducir los niveles de porosidad a un mínimo, lo cual se logra incorporando desengrasadores, y removedores químicos de óxido. Típicamente, esto se logra a través de una

combinación de limpiezas químicas y/o el uso de solventes para quitar hidrocarburos seguido por una limpieza por cepillos de alambre de acero inoxidable para quitar el óxido de aluminio.

Otras áreas de potenciales problemas son asociada a la preparación del material (pieza). Los métodos de corte y de aplicación del esmeril pueden depositar contaminantes en la superficie de la pieza o incrustarse adentro de la misma, o si es el caso la adhesión de una capa de hidrocarburos, o las virutas dejadas por la rueda del esmeril. Este tipo de partículas incrustadas en la pieza reaccionan cuando se procede a la aplicación de la soldadura y rebajan o perjudican las propiedades y/o el funcionamiento de la junta soldada.

Figura 16. Porosidad en el Aluminio en una Junta con Bisel*.

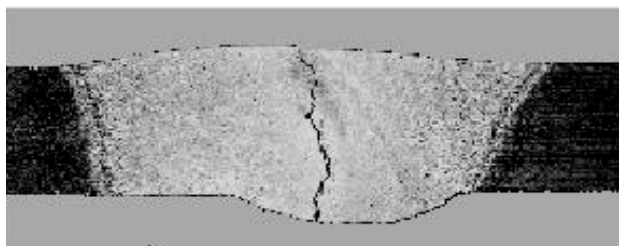


* http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk21.html

La correcta limpieza del aluminio antes de soldar como hemos visto es prioritaria parte antes de a soldar, el uso de procedimientos probados, el equipo de soldadura bien mantenido, la alta calidad del gas protector (en el caso de TIG y MIG) y un alambre de soldadura libre de contaminación, todo esto hay que tenerlo en cuenta para reducir la probabilidad de una excesiva porosidad. La porosidad es descubierta típicamente por pruebas radiografías.

- **AGRIETAMIENTO.** Un problema que puede ser encontrado fácilmente en la soldadura del aluminio es el agrietamiento por solidificación. Este es causado por la alta concentración de los esfuerzos generados a través del cordón debido al alto coeficiente de expansión térmica del aluminio (mas de 2 veces que del acero) y la sustancial contracción en la solidificación, típicamente un 5 % mas que las uniones soldadas de acero bajo las misma condiciones de operación.

Figura 17. Grieta Causada por Agrietamiento en Caliente*.



* http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk21.html

El agrietamiento por solidificación parte desde el centro del cordón, como se muestra en la figura 6. Las causas mas importantes para que ocurra este defecto en la soldadura del aluminio son las siguientes:

- Incorrecta selección de material de aporte
- Diseño incorrecto de la junta
- Soldadura por encima de condiciones de operación

El riesgo por agrietamiento puede ser reducido usando un material de aporte resistente a los agrietamientos (usualmente para los materiales de aporte de las series 4XXX Y 5XXX).

Hay un tipo de agrietamiento llamado, **agrietamiento de cráter**, que son pequeñas grietas o defectos del tipo de pata de cuervo y ocurren en la solidificación. Estas grietas pueden ser pequeñas, pero son muy serias, ya que generalmente ocurren al terminar una soldadura, cuando es más pronunciada la concentración de esfuerzo o efecto final.

Las grietas de cráter pueden reducirse al mínimo interrumpiendo o reiniciando la soldadura varias veces, de manera que el tubo que se forme en el cráter pueda lograr salida hacia fuera. A menudo se emplean cintas de corrimiento para prevenir la ocurrencia de grietas de cráter. Debe tenerse gran cuidado en determinar si hay presente grietas de cráter. Si se encuentran, deben eliminarse,

por rebaneado antes de soldar. La presencia de grietas de cráter puede determinarse por rayos X, pruebas ultrasónicas, de doblez guiado, y/o metalografías.

3.4. VARIABLES A CONSIDERAR DURANTE LA SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE

Cuando soldamos acero, la selección del material de aporte que necesita la soldadura esta basado en el esfuerzo de resistencia del metal base o pieza. La selección del material de aporte del aluminio no es típicamente tan simple como la del acero, y no esta basado solamente en el esfuerzo de resistencia del metal base. Con el aluminio hay un número de otras variables que se necesitan considerar cuando se selecciona el material de aporte. El entendimiento de estas variables es de suma importancia.

Cuando seleccionamos el material de aporte optimo, hay que considerar las propiedades de la pieza a soldar. Par escoger la aleación optima, le presentamos el método diseñado por la empresa ALCOTEC, líder en tecnología y el productor más grande del mundo de electrodos de alambre de aluminio para soldadura y radicada en los ESTADOS UNIDOS, el cual se muestra en el anexo c. las variable que hay que tener en cuenta para la selección del material de aporte son:

- Facilidad de la soldadura. Esta basado en la combinación del material de

aporte y el metal base, y la capacidad del cordón a resistir o mitigar la presencia de fisuras, como ya se trato en el subcapitulo 3.3. Esta evaluación se basa en la probabilidad de producirse un agrietamiento combinado en el cordón y el metal base.

- Resistencia del cordón. Esta evaluación esta basada en la habilidad de material de aporte en igualar o exceder el esfuerzo de diseño de la junta. En el caso de una junta de ranura, la resistencia del material de aporte esta basado en el esfuerzo cortante del mismo. La resistencia del material de aporte es muy dependiente de la composición de dicho material usado en la junta. Típicamente los materiales e aporte de la serie 4xxx, tienen una baja ductibiidad y proveen una baja resistencia al corte en la junta. Los de la serie 5XXX, tienen típicamente mas ductibilidad y poseen el doble de resistencia al corte en la junta que los de la serie 4XXX, comparados alas mismas condiciones de operación.

- Ductibilidad del cordón. La ductibilidad es la propiedad que se describe en un material a que fluya plásticamente después de la fractura. Las características de la fractura están descritas en términos, en la habilidad de sufrir deformaciones plásticas y tensiones elásticas bajo la presencia de aumentos de esfuerzo (discontinuidades del cordón en la junta). El material de aporte deberá ser seleccionado para que deforme plásticamente,

redistribuya y reduzca los esfuerzo que se crean al aparecer un agrieta o falla y aminorar la sensibiidad de aparición de una grieta. La ductibiidad debe ser tenida en cuenta cuando la junta soldada vaya a ser sometida a cargas de impacto.

- Temperatura de servicio. Cuando se trabaja a temperaturas de servicio por encima de 150°C (65 °C) deberemos considerar el uso de una aleación de aporte o material de aporte que pueda operar satisfactoriamente a esas temperaturas sin efectos indeseables que dañen el cordón de la junta o la unión soldada. La s aleaciones por encima del 3 % de Mg; que están expuestas a esas temperaturas, pueden producir una segregación de los átomos de magnesio en los límites de grano del material o más allá de estos. Esta es suna indeseable condición, la cual puede resultar en una falla prematura del componente soldado. Consecuentemente, ambas piezas a unir y materiales de aporte a utilizar con menos de 3 % de Mg, pueden desempeñarse bien a altas temperaturas

- Resistencia a la corrosión. Los metales base y los metales de aporte de aleación de aluminio son muy resistentes a la corrosión, como ya lo hemos mencionados en los capítulos anteriores. Pero en casos donde son usados piezas de diferentes aleaciones y materiales de aporte, se forma una corrosión galvánica que corroe a los metales, por lo cual en la soldadura

del aluminio, este tema es de mucho cuidado y se necesita de personal especializado y códigos de soldadura para trabajar con este tipo de problemas.

- Tratamiento térmico post-soldadura. Típicamente las aleaciones base tratables térmicamente, por ejemplo, la 6061-t6, pierde una sustancial proporción en sus propiedades mecánicas después de la soldadura. En orden de retornar las aleaciones base sus propiedades originales, se puede utilizar un tratamiento post-soldadura. Este tratamiento es una opción, y es necesario evaluar el material de aporte usado en cuanto a sus habilidades de responderá a dicho tratamiento. El material de aporte 4643, por ejemplo, fue desarrollado para soldar la aleaciones base 6XXX y desarrolla altas propiedades mecánicas en el tratamiento post-soldadura.
- Igualado del color después del anodizado. El color de una aleación de aluminio cuando es anodizado depende de su composición. El silicio en el aluminio causa un oscurecimiento en la aleación cuando es tratado químicamente durante el proceso de anodizado. Si un material de aporte con 5 % de silicio es usado para soldar una aleación base 6061, y la junta soldada es anodizada.

4. DISEÑO DE JUNTAS SOLDADAS

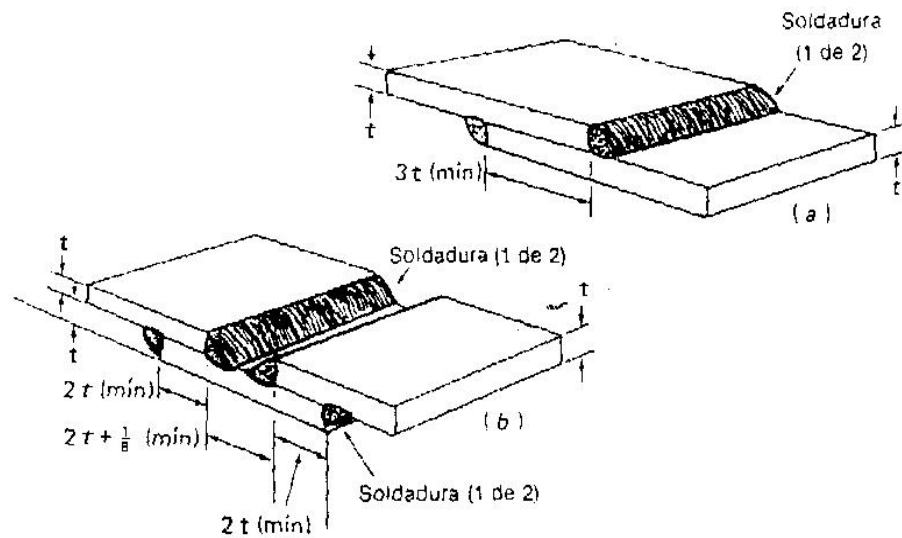
El objetivo de las uniones soldadas es de transferir esfuerzos entre los miembros y a través de la construcción soldada. Las fuerzas y las cargas se introducen en distintos puntos y se transmiten a diferentes áreas a través de las construcciones soldadas. La cantidad de esfuerzo por transferir a través de la unión se estima mediante cálculos, la experiencia, etc. El tipo de carga y el servicio de la construcción soldada tienen un gran efecto en el diseño de la unión que se seleccione. Todas las uniones soldadas son o bien uniones de penetración completa, o bien uniones de penetración parcial. Los nombres son suficientemente descriptivos. Sin embargo, una unión de penetración completa tiene metal de soldadura en la sección transversal completa de la unión. La unión de penetración parcial está diseñada para tener un área sin fundir. La soldadura no penetra completamente a la unión. La capacidad de la unión se basa en el porcentaje de la profundidad del metal de soldadura con respecto a la proporción total en la unión. Si el metal de soldadura penetra un cuarto del camino entre ambos lados, deja todavía la mitad de la unión sin fundir. Una unión de 50 % de penetración parcial tendría metal de soldadura en la mitad de la unión. Ya se mencionó antes que las construcciones soldadas sujetas a cargas estáticas solo necesitan de metal de soldadura suficiente para transmitir las cargas estáticas. Cuando se sujetan las uniones a cargas dinámicas, reversibles o de impacto la unión soldada debe ser

más eficaz. Esto es más importante si la construcción soldada trabajara a baja temperaturas. Con este tipo de servicio se necesitan soldaduras de penetración completa.

La resistencia de la unión soldada depende no solo del tamaño de la soldadura si no también de la resistencia del metal de la soldadura.

Hay muchos factores que se deben considerar al diseñar una unión soldada en aluminio y sus aleaciones. Muchos influyen en la economía del diseño de la unión soldada y en la resistencia de la misma, y en la capacidad del soldador para ejecutarla. El diseñador debe tener en cuenta los requisitos de resistencia mencionados aquí, y los requerimientos de penetración que dictan las cargas y el servicio. El diseño de la unión se debe adaptar a estos requisitos del modo más económico (Vease las figuras 18 y 19). Esto se hace analizando los siguientes factores:

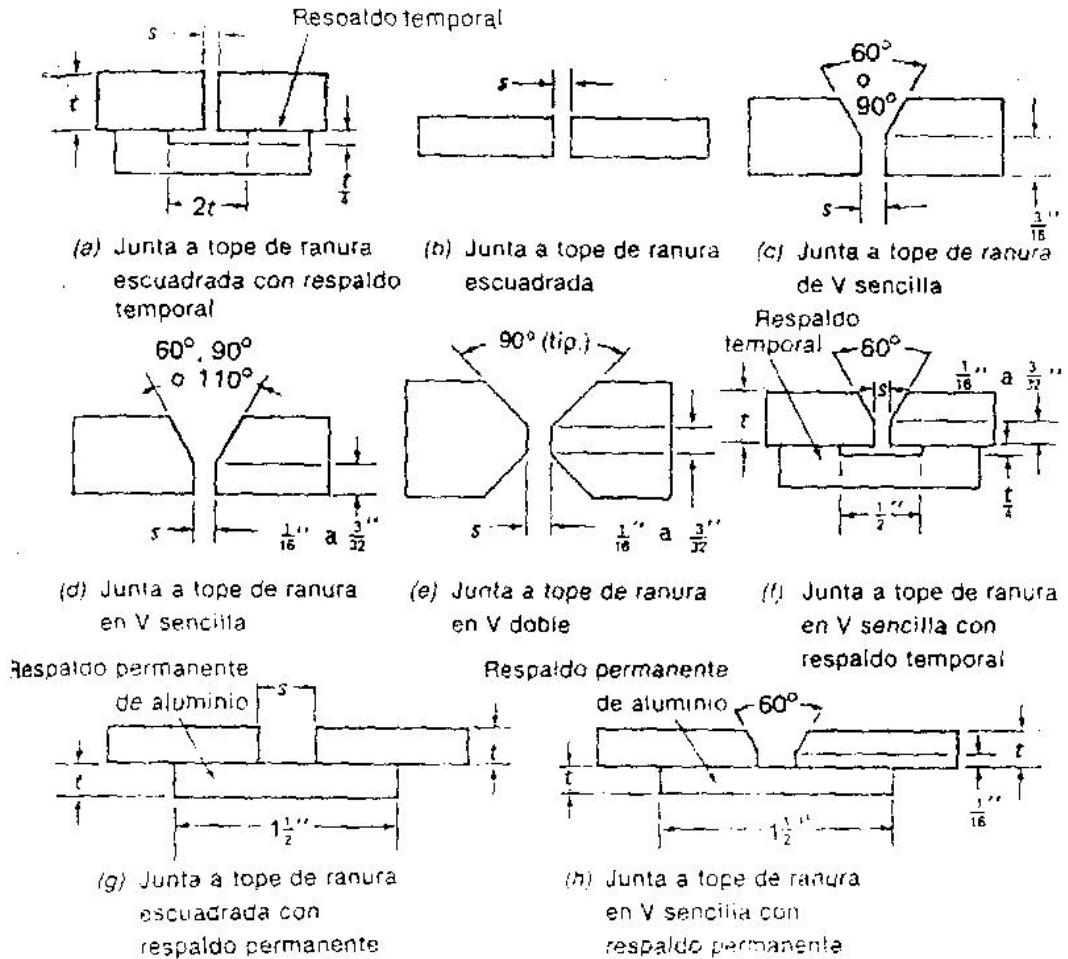
Figura 18. Uniones



Fuente: ASM HANDBOOK 6 Vol.

La unión soldada se debe diseñar para que su área transversal sea lo mas pequeña posible. El área transversal es una medida de la cantidad o pesos del metal de soldadura que se necesita para ejecutar la unión. Sin embargo, el área transversal pequeña podría no dar una unión soldada práctica.

Figura 19. Algunos Diseños de Juntas



Fuente: ASM HANDBOOK: Welding, Brazing, and Soldering, 9th edición, U.S.A, 1997, 1200 p. 6 Vol.

Otros factores económicos tienen que ver con la preparación de las orillas del aluminio, necesarias para producir el diseño particular de la unión soldada. Las uniones soldadas normalmente se preparan por tres métodos: corte, corte con

soplete, y maquinado. Su corte de preparación queda en este mismo orden. El corte o cizallamiento es el modo más económico de cortar metales; son embargo, hay limitaciones de espesor, y la orilla cortada es rectangular, sin biseles. El corte con esmeril es el método más común para preparar y se usa para la mayoría de los trabajos en placas metálicas de aluminio y no de láminas calibradas de aluminio). Se puede emplear para cortar orillas en ángulos rectos, pero también para hacer biseles. La cara de raíz o la orilla recta, el bisel ambos frontales. Se pueden ejecutar con un paso de soplete, especialmente en cortes de línea recta.

El maquinado es el tercer método de preparación pero implica equipo más costoso. Generalmente se usa el maquinado para preparar las penetraciones tipo J y U. se utiliza mucho para uniones soldadas en partes circulares. El diseño de la unión y el espesor del metal dictan el tipo de herramienta necesaria para la preparación

A veces, se hace un balance basado en el tipo de herramientas disponibles contra la cantidad de metal de necesaria para completar la unión.

Los detalles de cada unión se deben relacionar al proceso de soldadura que debe emplearse.

4.1 REGLAS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS PARA EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

Muchos productos no están amparados por códigos, reglamentos o especificaciones. Este documento recomienda la utilización de la norma de AWS D1.2-97 Y tener una guía para que los diseñadores consulten reglamentos o códigos que amparen productos semejantes los que se diseñan.

Cuando los diseñadote no apliquen estos códigos, se pueden usar la siguientes directrices para el diseño de las uniones soldadas del aluminio y sus aleaciones.

- Resistencia de diseño. Cada unión soldada debe diseñarse o seleccionarse para cumplir los requerimientos de resistencia de la aplicación que se persigue. Se debe tener encuentra la concentración de esfuerzos debido cambios abruptos en la sección transversal, especial mente cuando halla carga de impacto, fatiga o cuando el traba este a baja temperatura.
- Uniones estandarizadas. Utilizar las uniones soldadas del anexo E. Han sido diseñadas para emplear la misma cantidad de metal de soldadura. El diseño de otras uniones no descritas se deben hacer sobre la misma base
- Uniones de penetración completa. Los mejores resultados con tipo de cargas se han obtenido con las uniones diseñadas para penetración completa. En las

uniones que necesitan mayor eficacia se debe especificar CP en cola del mismo símbolo de soldadura. Para soldaduras de ambos lados, el la inclusión de CP en la cola del símbolo de la soldadura significa que el lado posterior de la unión se debe esmerilar hasta llegar a el metal limpio antes de depositar el segundo condón. Las uniones de bisel soldadas de un lado hasta una banda de respaldo con abertura especificada de raíz, se debe soldar con preparación completa a un cuando no se de especifique el CP.

- Tiempo de preparación de la unión. La unión soldada a debe seleccionar o diseñar de modo que necesiten el mismo de preparación de todos los lados con respecto al tiempo de soldadura necesario para llenar la unión. Generalmente es más económico biselar y soldar las placas delgadas de aluminio desde un solo lado; sin embargo, para la placa mas gruesa de aluminio requiere menos tiempo de biselar y soldar en ambos lados. Al comparar la soldadura del chaflán, la garganta efectiva de una soldadura de chaflán es menor que $\frac{3}{4}$ del tamaño de la soldadura mientras que la de la soldadura de bisel generalmente es igual ala del bisel.

- Preparación del bisel en J y U. Las ranuras en j y en u se deberán usar solo en partes que se preparen fácilmente por maquinado. En general, como ya mencionamos anteriormente en la sección pasada.

- Reducir el exceso de soldadura. El soldar demasiado aumenta los costos de soldadura y origina una distorsión adicional. Las uniones diseñadas para tener un eficacia del 100 % pueden estar sujetas a todo tipo de cargas; sin embargo, cuando la rigidez sea el principal requisito se pueden utilizar uniones con una eficacia tan reducida del 50 %.

- Soldadura intermitente de chaflán. Estas soldaduras solo deben usarse para resistir cuando los tamaños mínimos antes mencionadas sean demasiado grandes para soldadura continuas. Las asecciones a estos son las razones metalúrgicas o de combado. Las soldaduras intermitentes se deben usar siempre que sea posible, El metal laminado y partes estructurales cuando la raíz sea el objetivo principal.

- Longitud de la soldadura intermitente de soldadura de chaflán. Par materiales para espesores de $\frac{1}{4}$ o mayor la longitud mínima de la soldadura intermitente de chaflán deben ser su tamaño original, Peor no deben ser menor que 5cm, la longitud máxima debe ser 18 veces su tamaño nominal pero no mayor de 15 cm.

- Reducción de la soldadura. Siempre que sea posible elimínese una unión soldada hacinado dóblese sencillas.

CONCLUSIÓN

El proceso de soldabilidad del aluminio y sus aleaciones esta precedido de muchos factores que se deben tener en cuenta al momento de efectuar dicha operación, aparte de que se requiere del conocimiento de un buen soldador, para el empleo de este tipo de soldadura es necesario cumplir ciertas reglas o normas que se encuentran estipulados bajo ciertos códigos.

Entre los factores que afectan en la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones son los siguientes:

Conductividad térmica; encontramos que el calor se propaga mucho mas rápido que en el acero, dato a tener en cuenta para un resultado adecuado y no se creen fallas prematuras en la unión. Coeficiente lineal de expansión térmica; este es prioritario puesto que con el se controla las deformaciones volumétricas de la unión soldada, que como ser 2 veces mas grande que la del acero, se expande mucho mas, por lo que es recomendable controlar estos dos factores.

El mas importante para tener en cuenta de los factores que definen este trabajo tiene que ver con la capa de oxido del aluminio, que por ser un oxido refractario y estable presente en la superficie del aluminio y sus aleaciones. Tiene la

particularidad de que ofrece mayor resistencia al momento de someterla a temperaturas en la cual esta, funde más lento que el metal base. Este inconveniente es la clave fundamental para llevar a cabo un buen proceso de soldabilidad del aluminio y sus aleaciones. Se encontró además que para trabajar este oxido se debe:

1. hacer selección de un buen proceso de soldadura tales como:

- Oxiacetilénica. No es recomendable puesto que rebaja las propiedades mecánicas del material y se presenta porosidad excesiva en el cordón de la soldadura.

- MIG y TIG. Proceso por el cual se utiliza un electrodo consumible metálico protegido por un caudal de gas que evita su oxidación para el MIG y en el TIG es un electrodo no consumible.

2. Tener en cuenta los elementos aleantes presentes en la aleación como; cobre, magnesio, silicio, manganeso etc.

3. Trabajar con la polaridad adecuada que auto elimine dicha capa de oxido. Esto se hace utilizando los procesos más adecuados y recomendados para la soldadura, como es la utilización del proceso MIG con una polaridad invertida con

corriente directa y TIG con corriente alterna, por que debido a este tipo de polaridad y de corriente en cada proceso se genera un fenómeno tal que se logra desprender la capa de oxido permitiendo así que se suelde sin problemas las partes a unir.

Recomendamos los procesos TIG y MIG como los más adecuados para llevar a cabo la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones cumpliendo así con el objetivo de poder encontrar el óptimo proceso de soldadura. Además para el diseño de la soldada y el tipo de unión se rigen bajo normas contempladas en su respectiva designación, mostrando y dando los pasos más adecuados en el presente para llevar este proceso.

ANEXO A

Designación de las aleaciones forjadas de aluminio bajo diferentes normas (1)

ALUMINIUM ASSOCIATION	ISO NO. R209.
1050	Al99.5
1060	Al 99.6
1070	Al 99.7
1080	Al 99.8
1100	Al 99.0 Cu
1200	Al 99.0
1350	E- Al 99.5
1370	E- Al 99.7
2011	Al Cu6BiPb
2014	Al Cu4SiMg
2017	Al Cu4MgSi
2024	Al Cu4Mg1
2030	Al Cu4PbMg
2117	Al Cu2.5Mg
2219	Al Cu6Mn
3003	Al Mn1Cu
3004	Al Mn1Mg1
3005	Al Mn1Mg0.5
3103	Al Mn 1
3105	Al Mn0.5Mg0.5
4043	Al Si5
4047	Al Si12
5005	Al Mg1
5050	Al Mg1.5
5052	Al Mg2.5
5056	Al Mg5Cr
5083	Al Mg4.5Mn0.7
5086	Al Mg4
5154	Al Mg3.5

5183	Al Mg4.5Mn0.7
5251	Al Mg2
5356	Al Mg5Cr
5454	Al Mg3Mn
5456	Al Mg5Mn
5554	Al Mg3Mn
5754	Al Mg3
6005	Al SiMg
6060	Al MgSi
6061	Al Mg1SiCu
6063	Al Mg0.7Si
6082	Al Si1MgMn
6101	E-Al MgSi
6181	Al Si1Mg0.8
6262	Al Mg1SiPb
6351	Al Si1Mg0.5Mn
7005	Al Zn4.5Mg1.5Mn
7010	Al Zn6MgCu
7020	Al Zn4.5Mg1
7050	Al Zn6CuMgZr
7075	Al Zn5.5MgCu
7178	Al Zn7MgCu
7475	Al Zn6MgCuMn

(1) Para más información consultar el texto de la ASM HANBOOK Vol. 2. Pág. 24

ANEXO B

Aplicaciones practicas de las aleaciones de aluminio

Designación de la aleación	Aplicaciones típicas de la aleación
1050	Equipos químicos, vagones cisternas de trenes
1060	Equipos químicos, vagones cisternas de trenes
1100	Empleo en hojas de metal, aletas de disipadores de calor, hilado de recubrimiento de cerámicas
1145	Papel de hoja de estaño, disipadores de calor, en aletas
1190	Hoja de capacitor electrolítico, equipos químicos y vagones cisternas de trenes.
1350	Conductores eléctricos
2011	Tornillos y remaches
2014	Estructuras de vagones y de aviones
2024	Rines de camiones, tornillos y estructuras de aviones
2036	Laminas de carrocerías de autos
2124	Aplicaciones en aviones supersónicos del ejercito
2218	Turbinas de motores a reacción , rines de autos
2219	Usadas en estructuras de alta temperatura (315 ° C) de alta resistencia soldadas
2618	Motores de aviones
3003	Utensilios de cocina, equipos químicos, recipientes de presión , hojas de metal de trabajo , accesorios de construcción , tanques de almacenamiento
3004	Hoja de metal de trabajo, tanques de almacenamiento
3105	Casas móviles, artículos relacionado a la protección de la lluvia , accesorios arquitectónicos y hojas de metal de trabajo
4032	Pistones
4043	Electrodos de soldadura
5005	Instrumentos, utensilios, módulos arquitectónicos ,conductores eléctricos
5050	Tubos embobinados, refrigeración, paneles arquitectónicos
5052	Hoja de metal de trabajo, tubos hidráulicos , equipos
5056	Cables forrados , protección de cableado, cremalleras
5083	Recipientes de presión soldados, aplicaciones marinas,
5086	contenedores de transporte aéreo , componentes de misiles, antenas de TV.
5154	Estructuras soldadas , tanques de almacenamiento, recipientes de presión

5182	Carrocerías de autos, camiones, latas de bebidas y refrescos
5252	Aplicaciones en automóviles
5254	Recipientes de almacenamiento de peróxido de hidrógeno
5356	Electrodos de soldadura
5454	Estructuras soldadas, recipientes de presión, servicios marinos
5456	Estructura soldada de alta resistencia, tanques de almacenamiento, aplicaciones marinas
5457	
5652	Recipientes de almacenamiento de peróxido de hidrógeno
5657	Auto anonizado
6005	equipos estructuras de trabajo dura de alta resistencia a la corrosión, aplicaciones a camiones y buques, carro tanques de trenes, tuberías, enseres
6009	Carrocerías de autos
6010	Carrocerías de autos
6061	equipos estructuras de trabajo dura de alta resistencia a la corrosión, aplicaciones a camiones y buques, carro tanques de trenes, tuberías, enseres
6063	Extrusiones arquitectónicas, enseres
6066	Fomas forjadas, extrusiones para estructuras soldadas.
6070	Estructuras soldadas de trabajo duro, tuberías
6101	Buses conductores de alta resistencia (circuitos)
6151	Resistencia moderada, forjas complejas para máquinas y auto partes
6201	Alambres eléctricos de alta conductividad
6262	Tornillos de maquinaria
6351	equipos estructuras de trabajo dura de alta resistencia a la corrosión, aplicaciones en extrusiones para tractores y camiones Extrusiones para aplicaciones arquitectónicas y secciones livianas
6463	
7005	equipos estructuras de trabajo dura de alta resistencia a la corrosión, aplicaciones en camiones, remolques,
7049	Aviación y otras estructuras
7050	Aviación y otras estructuras
7072	Otras aleaciones, aleación cladding
7075	Aviación y otras estructuras
7175	Aviación y otras estructuras y forjados
7178	Aviación y otras estructuras
7475	Aviación y otras estructuras

ANEXO C

Temperatura de Recocido y Tratamiento de Precipitación de la Solución *

Designación de la aleación	Temperatura de recocido	Tratamiento térmico de la solución (°C)	Envejecimiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
1080A,1050A					
1200-1350	360-400	-	-	-	-
2011		525 ± 3	T3	Ambiente	48
			T6	160 ± 3	12
2014A		505±3		Ambiente	48
	350-370 ¹	T6	175 ± 3	8	48
2024	495 ± 3	T4	Ambiente	48	
2031	530 ± 3	T6	175 ± 3	12	
2117	495 ± 3	T4	Ambiente	96	
2618A	530 ± 3	T6	180 ± 3	20	
3103,3105	400-425	-	-	-	-
4043A,4047	350-370	--	--	----	-
5005,5056A					
5083,5154A	350-370	-	-	-	-
5251,5454		T4	Ambiente		-
5554,5556		530 ± 3	T6	175 ± 3	8
6061		T4	Ambiente		
		525 ± 3	T5-T6	175 ± 3	8
6063		T4	Ambiente		
		525 ± 3	T5-t6	175 ± 3	8
6063A		T4	Ambiente		
	350-370	525 ± 3	T4	175 ± 3	8
6082		525± 3	T6		120
		530 ± 3	T651		
6101A	525 ± 3	T4	Ambiente	120	
			T6	Ambiente	175 ± 3
6463	525 ± 3	T4	Ambiente	120	
				170 ± 3	5-15
7010	475 ± 3	T7651	172 ± 3 ²	10	
7020	290 ± 300 ⁺	475 ± 3			
7075	460 ± 3	T73	110 ± 3	18	24
				177 ± 3	8

* Para mas información ver la obra; El Aluminio y sus aleaciones, Frank KING Pág. 210

ANEXO D

Selección del Material de Aporte de Aleaciones de Aluminio*

aleacion base	material de aporte	1060, 1070, 1080, 1350	1100	2014, 2036	2219	3003, ALCLAD 3003	3004	ALCLAD 3004	5005, 5050	5052, 5652
características		W S D C T H	W S D C T H	W S D C T H	W S D C T H	W S D C T H	W S D C T H	W S D C T H	W S D C T H	W S D C T H
7005, 7021, 7039, 7046, 7146, 710.0, 711.0	4043	A A C A A	A A C A A	B B A A A	B B A A A	A B C A A	A D C B A	A D C B A	A B C B A	B D C B A
	4145	B A B A A	B A B A A	A A B A A	A A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	A A B A A
	5183	B A A A A	B A A A A			B A A A A	B A A A A	B A A A A	B A A A A	B A A A A
	5356	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A
	5554	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A
6061, 6070	4043	A A C A A	A A C A A	B B A A A	B B A A A	A B C A A	A D C A A	A D C A A	A B C A A	A D C A A
	4145	A A D B A	A A D B A	A A B A A	A A B A A	A A D B A	B C D B A	B C D B A	A B D B A	A D C A A
	4643 (1)	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B C B
	5183	B A A A A	B A A A A			B A A A A	B B A A A	B B A A A	B A A A A	B B A C A
	5356	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	C C A B A
6005, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	4043	A A C A A	A A C A A	B B A A A	B B A A A	A B C A A	A D C A A	A D C A A	A B C A A	A D C A A
	4145	A A D B A	A A D B A	A A B A A	A A B A A	A A D B A	B C D B A	B C D B A	A B D B A	A D C A A
	4643 (1)	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B C B
	5183	B A A A A	B A A A A			B A A A A	B B A A A	B B A A A	B A A A A	B B A C A
	5356	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	C C A B A
5454	4043	A B C C A	A B C C A			A B C C A	A D C C A	A D C C A	A B C C A	A D C C A
	5183	B A B B A	B A B B A			B A B B A	B A B B A	B A B B A	B A B B A	A A A B A
	5356	B A A B A	B A A B A			B A A B A	B B A B A	B B A B A	B A A B A	A A A B A
	5554	C A A A A	C A A A A			C A A A A	C C A A A	C C A A A	C A A A A	C C A A A
	5654	B A B B A	B A B B A			B A B B A	B A B B A	B A B B A	B A B B A	B C A B B
511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0, 5154, 5254	4043	A B C C B	A B C C B			A B C C B	A D C C B	A D C C B	A B C C B	A D C C B
	5183	B A B B A	B A B B A			B A B B A	B A B B A	B A B B A	B A B B A	A A B B B
	5356	B A A B A	B A A B A			B A A B A	B B A B A	B B A B A	B A A B A	A B A B B
	5554	C A A A A	C A A A A			C A A A A	C C A A A	C C A A A	C A A A A	C C A A B
	5654	B A B B A	B A B B A			B A B B A	B A B B A	B A B B A	B A B B A	A A B B B
5086, 5056	4043	A A B A A	A A B A A			A A B A A	A C C B A	A C C B A	A B C B A	A A B A A
	5183	A A A A A	A A A A A			A A A A A	A A B A A	A A B A A	A A A A A	A B A A A
	5356	A A A A A	A A A A A			A A A A A	A A B A A	A A B A A	A A A A A	A B A A A
	5554	A A B A A	A A B A A			A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A
	5654	A A B A A	A A B A A			A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	B C A A B
5083, 5456	4043	A B C B A	A B C B A			A B C B A	A C C B A	A C C B A	A B C B A	A A B A A
	5183	A A B A A	A A B A A			A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A
	5356	A A A A A	A A A A A			A A A A A	A A B A A	A A B A A	A A A A A	A A B A A
	5554	A A B A A	A A B A A			A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	C C A A A
	5654	A A B A A	A A B A A			A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A
5052, 5652	4043	A B C A A	A B C A A			A B C A A	A B C A A	A C C A A	A B C A A	A D C B A
	5183	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	A A B C B
	5356	B A A A A	B A A A A			B A A A A	B A A A A	B B A A A	B A A A A	A B A C A
	5554	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	C C A A B
	5654	B A B A A	B A B A A			B A B A A	B A B A A	B A B A A	B A B A A	A A B C B
5005, 5050	1100	C B A A A A	C B A A A A			C C A A A A	A B C A A	A B C A A	B A A A A	1100
	4043	A A C A A	A A C A A			A B C A A			A B D A A	4043
	4145	B A D B A	B A D B A			B B D B A				4145
	5183	C A B B B	C A B B B			C A B C B	B A B A A	B A B B A	B A C B B	5183
	5356	C A B B B	C A B B B			C A B C B	B A A A A	B A A B A	B A B B B	5356
ALCLAD 3004	1100	D B A A A A	D B A A A A			C C A A A A			1100	
	4043	A A C A A	A A C A A			A B C A A	A D D A A	A D D A A	4043	
	4145	B A D B A	B A D B A			B B D B A			4145	
	5183	C A B C B	C A B C B			C A B C A	B A C C A	B A C C A	5183	
	5356	C A B C B	C A B C B			C A B C A	B B B C A	B B B C A	5356	
3004	1100	D B A A A A	D B A A A A			C C A A A A			1100	
	4043	A A C A A	A A C A A			A B C A A	A B D A A		4043	
	4145	B A D B A	B A D B A			B B D B A			4145	
	5183	C A B B B	C A B B B			C B C A A	B A C C A	B A C C A	5183	
	5356	C A B B B	C A B B B			C A B C A	B B B C A	B B B C A	5356	
3003, ALCLAD 3003	1100	B B A A A A	B B A A A A			C B C A A	B A C C A	B A C C A	1100	
	4043	A A C B A	A A C B A	B A A A A	B A A A A	A A B A A	4043		4043	
	4145	A A C B A	A A C B A	A A B A A	A A B A A	A A C B A	4145		4145	
	2219	B A A A A	B A A A A	B A A A A A	A A A A A A	2219				
	4145	A A B A A	A A B A A	B C B C A	B C B C A	4043				
2014, 2036	2219	B A A A A	B A A A A	C A A A A A		2219				
	4043	A A B A A	A A B A A	B C B C A		4043				
	4145	A A B A A	A A B A A	A B C B A		4145				
	1100	B B A A A A	B B A A A A	1100						
	4043	A A B A A	A A B A A	4043						
1060, 1070, 1080, 1350	1100	B B A A A B	1100							
	1188	C C A A A A	1188							
	4043	A A B A A	4043							

5083, 5456	5086, 5056	511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0, 5154, 5254	5454	6005, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	6061, 6070	7005, 7021, 7039, 7046, 7146, 710.0, 711.0
W S D C T M	W S D C T M	W S D C T M	W S D C T M	W S D C T M	W S D C T M	W S D C T M
A A A A A	A A A A A	A A A A A	A A A A A	B B A A A A	B B A A A A	B B A A A A
A B B A A	A B B A A	A B B A A	A B B A A A	A B A A A A	A B A A A A	A B B A A A
A A A A A	A A A A A	A A A B A	A A A B A			A A A A B
A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	A D C B A	A D C B A	B D C B A
A B A A A	A B A A A	A B A A A	A B A A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A
A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	A B A A A	A B A A A	A B A A A
A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	B C A A A A	B C A A A A	B C A A A A
A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A
A A B A A	A A B A A	A A B A A	A A B A A	B C A A A	B C A A A	B C A A A
A D C A	A D C A	A D C A	A D C B A	A C B A A	A C B A A	4043 4145 4643 (1) 5183 5356 5554 5556 5654
A A B A A	A A B A A	B A B C B	B A B C A	A C B A A	A C B A A	
A B A A A	A B A A A	B B A C A	B B A C A	B A A C A	B A A C A	
B C A A A	B C A A A	C C A B B	C C A A A	C B A B B	C B A B B	
A A B A A	A A B A A	B A B C B	B A B C A	B A A C A	B A A C A	
B C A A A	B C A A A	C C A B B	C C A B B	C B A B B	C B A B B	
A B C A	A B C A	A B C A	A B C B A	A C B A A	4043 4145 4643 (1) 5183 5356 5554 5556 5654	
A A B A A	A A B A A	B A B C A	B A B C A	B A A C A	B A A C A	
A A A A A	A A A A A	B A A C A	B A A C A	B A A C A	B A A C A	
B A A A A	B A A A A	C A A B B	C A A A A	C B A B B	C B A B B	
A A B A A	A A B A A	B A B C A	B A B C A	B A B C A	B A B C A	
B A A A A	B A A A A	C A A B B	C A A B B	C B A B B	C B A B B	
A A B B A	A A B B A	A A B B A	A A B B A	4043 5183 5356 5554 5556 5654		
A B A B A	A B A B A	A B A B A	A B A B A			
B C A A A	B C A A A	B C A A A	B C A A A			
A A B B A	A A B B A	A A B B A	A A B B A			
B C A A A	B C A A A	B C A A A	B C A A B			
A A B A A	A A B A A	A A B B A	A A B B A			
B C A A A	B C A A A	B C A A A	B C A A A			
A A B A A	A A B A A	4043 5183 5356 5554 5556 5654				
A B A A A	A B A A A					
A A B A A	A A B A A					
A (2) B A A	4043 5183 5356 5554 5556 5654					
A A B A A						
4043 5183 5356 5554 5556 5654						

Donde las características expresadas en letras (símbolos) indican lo siguiente indican lo siguiente:

símbolo	características
W	facilidad de la soldadura : relativa facilidad para soportar agrietamientos durante la soldadura.
S	Resistencia de la junta soldada: aplicada muchas veces ala soldadura en filete. Todos los rollos y electrodos fueron desarrollados para resistir los esfuerzos en la junta.
D	Ductibilidad : se refiere ala facilidad de elongación del cordón y soportar la aparición de grietas
C	Resistencia ala corrosión en inmersiones alternadas en agua salada.
T	Recomendadas a temperaturas de servicio por encima de 150°C (65° C)
M	Iguala o asemeja el color del anonizado
A, B, C Y D estan evaluadas en orden decreciente según el merito. los grados tienen significado relativo solamente dentro de un bloque dado	

Se usa de la siguiente manera:

1. selecciones el material base a soldar (uno del lado izquierdo de la columna que dice: aleación base y otro del lado superior derecho que dice: material de aporte).
2. Encuentre el bloque donde la columna y la fila se interceptan.
3. este bloque contiene filas horizontales de letras A, B, C, o D, las cuales dan con cada material de aporte que se encuentra en la respectiva fila del bloque. estas mismas letras dan con los símbolos de cada bloque de aleación base, lo que quiere decir, que cada letra identifica o evalúa a cada símbolo (ver tabla de símbolo).

4. De aquí depende de una evaluación cualitativa y cuantitativa de cada material de aporte con su respectiva calificación , y se escogerá en este caso y sin incluir todavía en los costos el de la mejor calificación , como por ejemplo :

Ejemplo 1.

Se requiere unir por soldadura las aleaciones de aluminio con la siguiente designación, un 3003 y 1100.

Primero se busca la intercepción del bloque, como ya se explico. Nótese que el material de aporte que más se aproxima a la mayor calificación es el 1100, ya que posee una excelente ductibilidad (D), resistencia ala corrosión (C), y así sucesivamente con los demás símbolos. Sin embargo la resistencia de la junta, y resistencia a la aparición de grietas (W y S) es de mucha importancia, lo cual lleva ala conclusión que se puede sacrificar el anonizado y la ductibilidad pueden ser sacrificado para obtener (W y S) y por lo visto el mejor material, para unir las dos piezas, es el material de aporte 4043.

NOTA: las combinaciones que aparecen sin evaluar, no son usualmente recomendadas. Las evaluaciones no se aplican a estas aleaciones cuando son tratadas después del tratamiento térmico post-soldadura.

- El material de aporte 4643 es tratable térmicamente y da alta resistencia con aleaciones base de la serie 6XXX cuando es tratada térmicamente la solución y envejecida, con un tratamiento post-soldadura.

ANEXO E

Soldabilidad del Aluminio y sus Aleaciones

Aleación	gas	Arc o con gas inert e	Soldadura por resistencia	Soldadura por Presión	Soldadura fuerte	Soldadura blanda con fundente		Esfuerzo De ruptura A Tensión (psi)	Resistenci A la Fluencia por Tensión (psi)
						Baja Temp	Alta Temp		
1060-0	A	A	B	A	A	A	A	10,000	4,000
1060-H14	A	A	A	A	A	A	A	14,000	13,000
1100-0	A	A	B	A	A	A	A	12,000	4,000
3003-0	A	A	A	A	A	A	A	13,000	5,000
3003-H18	A	A	A	A	A	A	A	24,000	22,000
3004-0	A	A	B	A	B	B	A	26,000	10,000
3004-H38	A	A	A	B	B	B	A	41,000	36,000
2011-T3	D	D	D	D	D	D	D	55,000	43,000
2011-T8	D	D	D	D	D	D	D	59,000	45,000
2014-T4	D	C	B	C	D	D	D	62,000	42,000
2014-T6	D	C	B	D	D	D	D	70,000	60,000
2017-T4	D	C	B	D	D	D	D	62,000	40,000
2018-T61	D	C	B	D	D	D	D	61,000	46,000
2024-T3	D	C	B	C	D	D	D	70,000	50,000
2024-T36	D	C	B	C	D	D	D	72,000	57,000
2219-T31	D	A	A	C	D	D	D	50,000	37,000
2219-T81	D	A	A	C	D	D	D	70,000	53,000
4032-T6	D	B	C	C	D	D	D	55,000	46,000
5005-0	A	B	B	A	B	B	A	18,000	6,000
5005-H38	A	A	A	B	B	B	A	29,000	27,000
5050-0	A	A	B	A	B	C	B	21,000	8,000
5050-H38	A	A	A	B	B	C	A	32,000	29,000
5052-0	A	A	B	A	C	C	C	28,000	13,000
5052-H38	A	A	A	B	C	C	C	42,000	37,000
5056-0	C	A	B	B	D	D	D	42,000	22,000
5056-H38	C	A	A	C	D	D	D	60,000	50,000
5083-0	C	A	B	B	D	D	D	42,000	21,000
5083-H113	C	A	A	C	D	D	D	46,000	33,000
5086-0	C	A	B	B	D	D	D	38,000	17,000
5086-H34	C	A	A	C	D	D	D	47,000	37,000
5154-0	C	A	B	A	D	D	D	35,000	17,000
5154-H34	C	A	A	B	D	D	D	42,000	33,000
5154-H38	C	A	A	B	D	D	D	48,000	39,000
5454-0	C	A	B	B	D	D	D	36,000	17,000
5454-H34	C	A	A	B	D	D	D	44,000	35,000
5456-0	C	A	B	B	D	D	D	45,000	23,000
5456-H321	C	A	A	C	D	D	D	51,000	37,000
6053-T4	A	A	A	B	A	B	B	30,000	20,000
6056-T6	A	A	A	B	A	B	B	37,000	32,000
6061-T4	A	A	A	B	A	B	B	35,000	21,000
6061-T6	A	A	A	B	A	B	B	45,000	40,000
6062-T4	A	A	A	B	A	B	B	35,000	21,000
6062-T6	A	A	A	B	A	B	B	45,000	40,000
6063-T5	A	A	A	B	A	B	B	27,000	21,000
6070-T4	D	A	A	B	B	A	A	49,000	30,000
6070-T6	D	A	A	B	B	A	A	57,000	52,000

6071-T4	D	A	A	B	B	A	A	49,000	30,000
6071-T6	D	A	A	B	B	A	A	57,000	52,000
6151-T6	A	A	A	B	B	B	B	48,000	43,000
6951-0	A	A	B	A	A	B	A	16,000	7,000
6951-T6	A	A	A	B	A	B	A	-	-
X7006-T63	D	A	B	D	C	D	C	61,000	55,000
7075-T6	D	C	B	D	D	D	D	83,000	73,000

Nota: las clases A, B, C, y D se definen como sigue:

- A. generalmente soldables por los métodos usuales.
- B. Soldables con técnica especial o en aplicaciones específicas.
Se desarrollan el procedimiento de soldadura y el desempeño esta.
- C. Soldabilidad limitada por sensibilidad al agrietamiento o pérdida de resistencia a la corrosión y de propiedades mecánicas.
- D. No se han desarrollado métodos de soldadura.

Origen: HORWITZ, Henry, Alfaomega, 2002, 582-584 p.

ANEXO F

Propiedades Típicas de Algunas Aleaciones de Aluminio*

Aleación	Coeficiente promedio de expansión térmica. $\mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$	Punto de fusión aproximado ($^\circ\text{C}$)	Tratamientos Térmicos aplicado	Resistividad eléctrica a 20°C ($\text{O mm}^2/\text{m}$)
1060	23.6	645-655	O	0.028
1100	23.6	643-655	O	0.030
1350	23.75	645-655	Todos	0.028
2011	22.9	540-643	T3	0.045
2014	23.0	507-683	O	0.035
2017	23.6	513-640	O	0.035
2024	23.2	500-638	O	0.035
2025	22.7	520-640	T6	0.043
2036	23.4	555-650	T4	0.0415
2117	23.75	555-650	T4	0.043
2219	22.3	543-643	O	0.040
3003	23.2	643-655	O	0.035
3004	23.9	630-655	Todos	0.0415
3105	23.6	635-655	Todos	0.038
4043	22.1	575-635	O	0.0415
4045	21.05	575-600	Todos	0.038
4343	21.6	577-613	Todos	0.0415
5005	23.75	632-655	Todos	0.033
5050	23.75	625-650	Todos	0.035
5052	23.75	607-650	Todos	0.050
5056	24.1	568-638	O	0.060
5083	23.75	590-638	O	0.060
5086	23.75	585-640	Todos	0.055
5154	23.9	593-643	Todos	0.053
5252	23.75	607-650	Todos	0.050
5356	24.1	570-635	O	0.060
5454	23.6	600-645	O	0.0515
5456	23.9	568-638	O	0.060
6005	23.4	610-655	T1	0.0365
6061	23.6	580-650	O	0.0365

6063	23.4	615-655	O	0.030
6070	23.4	565-650	T6	0.0465
6101	23.4	620-655	T6	0.040
6105	23.4	600-650	T1	0.038
6201	23.4	607-655	O	0.0315
6463	23.4	615-655	T1	0.035
7049	23.4	475-635	T73	0.043
7050	24.1	490-630	T74	0.0415
7072	23.6	640-655	O	0.030
7075	23.6	475-635	T6	0.0515
7178	23.4	475-630	T6	0.055

* Tomado del texto ASM HANBOOK Vol. 2. Pág. 45-46 p.

ANEXO G

Resumen de Formulas para Calcular los Esfuerzos Permisibles De Uniones Soldadas de Aluminio*

 $S = \frac{P}{A}$	 $S = \frac{P}{(h_1 + h_2)l}$	 $S = \frac{0.707P}{A}$	 AMBAS PLACAS DEL MISMO ESPESOR $S = \frac{0.707P}{A}$
 $S = \frac{6M}{h^2}$	 $S = \frac{37M}{h(3I^2 - 6Th + 4h^2)}$	 EL ESFUERZO EN LA SOLDADURA A ES IGUAL AL ESFUERZO EN LA SOLDADURA B $S = \frac{1.414P}{(h_1 + h_2)l}$	 SOLDADURA A $S = \frac{1.414P}{(h_1 + h_2)l}$ SOLDADURA B $S = \frac{1.414P}{(h_1 + h_2)l}$
 $S = \frac{P}{A}$	 $S = \frac{P}{(h_1 + h_2)l}$	 $S = \frac{0.707P}{A}$ CORTE TRANSV.	 $S = \frac{1.414P}{h_1(l_1 + l_2)}$ $l_1 = \frac{1.414P_2}{Sh_b}$, $l_2 = \frac{1.414P_1}{Sh_b}$
 $S = \frac{6M}{h^2}$	 $S = \frac{37M}{h(3I^2 - 6Th + 4h^2)}$	 $S = \frac{0.354P}{A}$	 $S = \frac{0.707P}{A}$
 $S = \frac{0.707P}{A}$ $S_0 = \frac{P}{A}$	 $S = \frac{0.707P}{A}$ $S_0 = \frac{P}{A}$	 $S = \frac{1.414M}{h(b+h)}$	 PROM. $S_0 = \frac{0.707P}{A}$ MAX $S = \frac{P}{h(b+h)} \sqrt{2} \approx \frac{(b+h)^2}{2}$
 $S = \frac{6M}{h^2}$	 $S = \frac{37M}{h(3I^2 - 6Th + 4h^2)}$	 $S = \frac{4.24M}{h^2}$	 PROM. $S_0 = \frac{0.707P}{A}$ MAX $S = \frac{4.24P}{h^2}$
 $S = \frac{0.707P}{A}$	 $S = \frac{0.707P}{A}$	 SOLDADURA DE CHAFLAN (h) $S = \frac{2.62M}{hD^2}$	 SOLDADURA DE CHAFLAN (h) $S = \frac{5.69M}{hD^2}$
 $S = \frac{M(3l + 1.8h)}{h^2l^2}$	 $S = \frac{M}{2l \cdot h(2l - h)}$	 SOLDADURA DE CHAFLAN (h) $S = \frac{4.24M}{h(b^2 + 3hb + h^2)}$	 SOLDADURA DE CHAFLAN A TOPE $S = \frac{1.414P}{2h \cdot h_1}$ $S = \frac{P}{2h \cdot h_1}$

S = ESFUERZO NORMAL, kg/cm² I = MOMENTO DE INERCIA, cm⁴ D = CARGA EXTERNA, kg H = TAMAÑO DE LA SO
 S_0 = ESFUERZO UNITARIO, kg/cm² M = MOMENTO FLEXIONANTE, kg/cm L = DISTANCIA LINEA, cm l = LONGITUD DE LA S

* KAISER ALUMINUM & CHEMICAL SALES, INC: Proceso de Fabricación del Aluminio, California, 1995. 135 p.

BIBLIOGRAFÍA

- ASM HANDBOOK; Properties and selection: NONFERROUS ALLOYS AND ESPECIAL PURPOSE MATERIAL, USA, 1997, 2 Vol.
- ASM HANDBOOK; WELDING, BRAZING, AND SOLDERING, USA, 1997, 6 Vol.
- HORWITZ, HENRY; SOLDADURA, APLICACIONES Y PRÁCTICAS. BOGOTA, ALFAOMEGA. 1998. 715 p.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Normas colombianas para la presentación de trabajo de investigación. Séptima actualización. SANTA FE DE BOGOTA D.C. ICONTEC, 2002. 126 p. NTC 1486.
- KING, FRANK, EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES, MEXICO, LIMUSA ,1988. 335p.
- KOELLHOFFER, LEONORD, MANUAL DE SOLDADURA, MEXICO, LIMUSA, 2001, 550 P.
- NEELY E., MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA, MEXICO, LIMUSA. 1992. Pág. 40-42.
- SOLÀ, PERE MOLERA, SOLDADURA INDUSTRIAL: CLASES Y APLICACIONES, BARCELONA, MARCOMBO. 192. 121 P.

- WILLIAM F. SMITH, FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES, España, Mc-graw Hill, 1998. 715 p.
- KAISER ALUMINUM & CHEMICAL SALES, INC: Procesos de Fabricación del Aluminio. California, Centro Kaiser, 1965 300p.

Paginas relacionadas en la Web:

- <http://www.alumina.com.co>
- <http://www.alcotec.com>
- <http://www.aluminum.org>
- <http://www.twi.co.uk>
- <http://www.jwharris.com/welprod/alaalloys/>
- http://www.welding_advisers.com/welding_aluminum.html
- http://www.aluminio.com.ve/sector/pag_esp/aluminiocont.html