



EL ALUMINIO

PÁG.	
2	EL ALUMINIO
2	Historia y obtención
3	Propiedades
4	Criterios de denominación
5	Estados básicos
8	Tratamientos
11	LA EXTRUSIÓN
11	Transformación del aluminio
14	EL ALUMINIO
14	Comportamiento frente a la corrosión
16	EL ANODIZADO
16	Protección superficial
19	LA SOLDADURA
19	Información
26	EL ALUMINIO
26	Compatibilidades

EL ALUMINIO

El aluminio es uno de los metales más modernos si lo comparamos con la metalurgia nacida hace más de 5000 años. Fue a comienzos del siglo XIX cuando un químico danés Hans Cristian Oersted aisló el metal por primera vez en 1825 por medio de un proceso químico que utilizaba una amalgama de potasio y cloruro de aluminio. El químico alemán Wöhler en el año 1827 lo obtuvo en forma de polvo al hacer reaccionar el potasio con el cloruro de aluminio y posteriormente en el año 1845, él mismo, determinó por primera vez las propiedades del metal recién descubierto, densidad y ligereza y lo separó en forma de bolitas.

El aluminio es sumamente abundante en la composición de la corteza terrestre (y en la luna), se halla en una proporción aproximada del 15% y sólo el sílice lo supera.

El mineral industrial más significativo es la "bauxita" con un contenido entre el 55 y el 65 de alúmina (óxido de aluminio Al_2O_3), que se encuentra localizado principalmente en la zona tropical. Este mineral fue descubierto por M. Pierre Berthier que lo llamó así por el lugar donde la encontró, la aldea de Les Baux de Provenza, en Arlés, Francia meridional.

En España encontramos bauxita, pero en muy pequeñas cantidades en Teruel, Barcelona, Tarragona y Lleida.

En 1854 Bunsen logró preparar electrolíticamente el aluminio partiendo en sus experiencias del compuesto cloruro aluminico sódico. Ese mismo año Henri Sainte-Claire Deville perfeccionó el procedimiento y fabricó por primera vez en la historia aluminio sustituyendo el potasio por sodio y lo presentó en la exposición de París de 1855, en forma de lingotes. Puede decirse, por tanto, que Deville fue el iniciador de la producción

industrial del metal cuyo procedimiento, con ligeras modificaciones se utilizó hasta el año 1888 que fue sustituido por el método electrolítico.

Los fundadores de la gran industria del aluminio fueron el francés Héroult, el alemán Kiliani y el norteamericano Hall, fundándose por el primero, en 1888, la sociedad Aluminium Industrie Aktien Gesellschaft. Unos cuarenta años después de la fundación de la industria del aluminio, surge en España, en 1929, la primera planta de importancia notable de producción de aluminio situada en Sabiñánigo (Huesca). La producción actual de aluminio primario en España está localizada en San Ciprian (Lugo), A Coruña y Avilés.

El aluminio es un metal demasiado activo para existir libre, encontrándose en la naturaleza combinado con cantidad de minerales, siendo los principales la bauxita y la criolita. La bauxita es el más importante de los minerales de aluminio, se trata de un hidróxido cuya composición no corresponde a una fórmula química determinada pues en todos los casos se encuentra combinada con cantidades variables de los elementos como el hierro, silicio y titanio y una cuantía inconstante de agua de combinación. Su color varía desde el granate al blanco puro. La criolita es, con la bauxita, el mineral de mayor importancia en la fabricación de aluminio, siendo su principal papel el de fundente de la alúmina en los baños electrolíticos. Actualmente se está sustituyendo la criolita por ciolita, un fluoruro artificial de aluminio, sodio y calcio.

METALURGIA

La extracción del aluminio de la bauxita se efectúa en tres etapas, minería, refinación y reducción.

La bauxita se extrae, se lava y se seca antes de ser destinada a la refinación donde se separa del aluminio.

El químico austriaco Karl Josef Bayer hijo del fundador de compañía Química Bayer inventó el proceso Bayer para la producción a gran escala de alúmina a partir de bauxita. Este método es el que más se usa en la industria del aluminio.

Partiendo de la bauxita, sometida previamente a un proceso de desecación y moliendo finamente el material, se calienta con una solución concentrada de soda cáustica (NaOH) para obtener una solución de aluminato sódico (AlO_2Na) y algo de silicato sódico (Na_2SiO_2).

Esta solución se filtra y se hace precipitar hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$), bien con dióxido de carbono o bien con una pequeña cantidad de hidróxido de aluminio previamente precipitado.

La alúmina se reduce a aluminio en unas células electrolíticas del procedimiento Hall-Héroult. En estas células se usa criolita fundida a 980°C para disolver la alúmina, la que al someterse a electrólisis se divide en aluminio y oxígeno. El aluminio baja al fondo del depósito donde se extrae periódicamente y el oxígeno se combina con el carbono del ánodo para producir CO_2 .

Por la acción de la corriente eléctrica suministrada, se descompone la alúmina introducida en el interior de la célula u horno electrolítico y según las leyes que rigen la electrolisis, en el electrodo negativo (cátodo) constituido por el revestimiento del horno, se deposita aluminio, de aquí se extrae el metal y se cuela en forma de placas de laminación, tochos o billetas para extrusión o lingotes para fundición.

De acuerdo con las mismas leyes, en el electrodo positivo (ánodo) se va produciendo oxígeno, que, debido a su gran actividad, reacciona con el carbono de dicho electrodo, formando los productos gaseosos mono y dióxido de carbono (CO y CO_2). Debido a esta reacción se produce un desgaste del ánodo por lo que hay que reponerlo periódicamente. Los bloques del ánodo son de carbón.

Para hacer 1000 Kg. de aluminio, se necesita 10.000 Kg. de bauxita que producen 500 kg. de alúmina 80 kg., de criolita, 600 kg. de carbón más 14.000 kWh de energía eléctrica. Por su alto consumo eléctrico las plantas de electrolisis del aluminio se montan junto a lugares donde la energía es más barata como, centrales hidroeléctricas, nucleares o países productores de petróleo.

EL ALUMINIO RECICLADO

Una de las características más destacables del aluminio es su capacidad de reciclado. Al contrario de lo que ocurre con otros metales, el 100% del material puede ser reutilizado. Asimismo, este proceso de reciclaje puede realizarse casi indefinidamente sobre el mismo material por lo que puede considerarse la vida útil del aluminio prácticamente ilimitada.

Otro de los condicionantes más importantes de este proceso de reciclado es que necesita aproximadamente el 5% de la energía que se utiliza para la obtención del aluminio primario.

Por otra parte, las características y propiedades del material no varían con esta transformación por lo que la calidad del aluminio primario y el reciclado es la misma.

PROPIEDADES

El aluminio es un metal plateado muy ligero. Su masa atómica es 26,9815, tiene un punto de fusión de 660°C y un punto de ebullición de 2.467°C, y una densidad relativa a 2,7 kg/m³. Es un metal muy electropositivo y extremadamente reactivo.

Al contacto con el aire se cubre rápidamente con una capa dura y transparente de óxido de aluminio que lo protege de la corrosión.

Nombre	Aluminio
Nº atómico	13
Valencia	3
Electronegatividad	1,5
Radio covalente (Å) Estado de oxidación	0,50 (+3)
Radio atómico (Å)	1,43/1,82
Configuración electrónica	[Ne]3s23p1
Primer potencial de ionización (eV)	6,00
Masa atómica (g/mole)	26,9815
Densidad	2,7
Punto de ebullición (°C)	2467
Punto de fusión (°C)	660
Radio iónico	0,535 Å
Volumen atómico	10 cm ³ /mole
Orbitario que llena	3p
Nº de electrones	(sin carga) 13
Nº de protones	13
Estado de la oxidación	3
Electrones de Valance	3 s2p1
Equivalencia electroquímica	0,33556g/amp-hr
Función del trabajo del electrón.	4,28 eV
Electronegatividad (Pauling)	1,61
Calor de fusión	10,79kJ/mole
Potencial del electrón de Valance	(-eV) 80,7
Módulo elástico: bulto	76/GPa
Módulo elástico: rigidez	26/GPa
Módulo elástico: youngs	70/GPa
Entalpia de atomización	322,2kJ/mole@25°C
Entalpia de fusión	10,67 kJ/mole
Entalpia de la vaporización	293,7 kJ/mole
Reflectividad optica	71%
Volumen molar	9,99 cm.3/topo
Calor específico	0,9J/gk
Presión del vapor	2,4E-06Pa@660.25°C
Conductividad eléctrica	0,377 106/cm
Conductividad termal	2,37 W/cmK

ESPAÑA: NORMAS U.N.E. (UNA NORMA ESPAÑOLA)

Las aleaciones de aluminio se identifican con la letra L = (aleación ligera) seguida de cuatro cifras que comienzan por:

L - 3.XXX que corresponden a aleaciones de forja (extrusión y laminación).

L - 2.XXX que corresponden a aleaciones de fundición.

Las siguientes tres cifras conforman los grupos de las siguientes aleaciones:

0XX = Aluminio Puro

1XX = Aluminio - Cobre

3XX = Aluminio - Magnesio

4XX = Aluminio - Magnesio - Silicio

5XX = Aluminio - Silicio

7XX = Aluminio - Zinc

8XX = Aluminio - Manganeso

9XX = Varias

Ejemplo: La aleación del 99,5 % de Al es igual a L- 3051.

Además existe otra denominación consistente en una numeración de cinco cifras que son:

38.XXX Para el grupo de aleaciones de aluminio. Siendo las tres últimas cifras (XXX) las que coinciden con las tres primeras de la anterior denominación (UNE), excepto las de aluminio puro que eran L-114 / L-115 / L-116 / L-117 / L-118.

Ejemplo: La aleación del 99,5% de Al es igual a L-3051 - 38.114.

U.E. (UNIÓN EUROPEA)

La denominación Europea (C.E.N.) tiene una denominación numérica basada en las normas A.A. (Aluminium Association) pero anteponiendo las letras EN AW a cuatro dígitos.

Ejemplo: 1050 A (A.A.) = EN AW - 1050 A

También corresponde una denominación alfanumérica con los símbolos químicos de los metales de aportación según normas I.S.O.

Ejemplo: 1050 A = EN AW 99,5

DENOMINACIONES REGISTRADAS ALU-STOCK

Las denominaciones de Alu-stock se basan en la contracción literal de los metales de mayor aportación a la aleación seguido del sufijo "TOK":

Puraltok:	Aluminio puro	(serie 1000)
Cobrealtok:	Aluminio - Cobre	(serie 2000)
Almantok:	Aluminio - Manganeso	(serie 3000)
Silicaltok:	Aluminio - Silicio	(serie 4000)
Magnealtok:	Aluminio - Magnesio	(serie 5000)
Simagaltok:	Aluminio - Silicio - Magnesio	(serie 6000)
Alzintok:	Aluminio - Zinc	(serie 7000)

ESTADOS UNIDOS:

NORMAS AA (ALUMINIUM ASSOCIATION)

Se representa por un código de cuatro cifras :

1	0	50
2	0	24
3	1	03
4	0	43
5	7	54
6	0	63
7	4	75
8	0	01

La primera cifra indica :

- 1 - Aluminio Puro
- 2 - Aluminio - Cobre
- 3 - Aluminio - Manganeso
- 4 - Aluminio - Silicio
- 5 - Aluminio - Magnesio
- 6 - Aluminio - Magnesio - Silicio
- 7 - Aluminio - Zinc
- 8 - Otras aleaciones

La segunda cifra indica :

En el grupo 1: identifica variantes en las cuales ciertas impurezas tienen tolerancias controladas.

En los grupos 2 a 8, las dos últimas cifras indican:

En el grupo 1: El porcentaje de aluminio más allá de 99 %.

En el grupo 2 a 8: Sirven solamente para identificar la aleación.



DENOMINACIÓN DE LOS ESTADOS BÁSICOS DEL PROCESO

F: Bruto de fabricación

Aplicado al proceso de fabricación de los semi-productos en el que no existen controles especiales sobre las condiciones térmicas o deformación en frío empleados. No hay valores establecidos para las características mecánicas.

O: Recocido

Aplicado a los semi-productos para obtener el estado más bajo de resistencia.

H: Acritud (Generalmente estirado/laminado).

Aplicado a semi-productos cuya resistencia ha aumentado mediante deformación en frío, con o sin tratamiento térmico intermedio para conseguir alguna reducción de las características mecánicas.

W: Tratamiento térmico de solución y temple

Es un estado aplicado únicamente a las aleaciones que maduran espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento a solución y temple. Este estado solo utilizará cuando se indica el tiempo del madurado natural. Por ejemplo W 1/2 hora.

T: Tratamiento térmico de endurecimiento estructural

A semi-productos en los que se aumenta su resistencia mecánica mediante tratamiento térmico con o sin acritud suplementaria, para obtener estados estables.

SUBDIVISIONES DE LOS ESTADOS BÁSICOS DE TRATAMIENTO DEL ALUMINIO

1. SUBDIVISIÓN DEL ESTADO H: ACRITUD

1.1. La primera cifra que sigue a la H indica la variación específica de las operaciones básicas del proceso según:

H1: Acritud solamente

Las características mecánicas se consiguen mediante un último proceso de deformación en frío.

H2: Acritud y recocido parcial

Las características mecánicas se obtienen mediante un tratamiento térmico final. Por lo general, este estado presenta mayor alargamiento que un H1 con la misma resistencia.

H3: Acritud y estabilizado

Aplicado a los semi-productos que son endurecidos por deformación plástica en frío y cuyas características mecánicas han sido estabilizadas posteriormente por un tratamiento térmico a baja temperatura. La estabilización generalmente disminuye la resistencia mecánica y aumenta la ductilidad. Esta denominación es únicamente aplicable a aquellas aleaciones que si no son estabilizadas sufren un ablandamiento a temperatura ambiente, como las de AlMg.

1.2. El dígito que sigue a las designaciones H1, H2 y H3 hace referencia a las características mecánicas del semiproducto:

HX2: Estado 1/4 duro. Su resistencia a la tracción se encuentra aproximadamente a la mitad entre la del estado recocido y la del semiduro.

HX4: Estado semiduro. Su resistencia a la tracción se encuentra aproximadamente a la mitad entre la del estado recocido y la del duro.

HX6: Estado 3/4 duro. Su resistencia a la tracción se encuentra aproximadamente a la mitad entre la del estado semiduro y la del duro.

HX8: Estado duro. Tiene el máximo grado de acritud generalmente utilizado.

HX9: Estado extraduro. Su resistencia a la tracción excede a la del estado duro. Los dígitos impares indicarán estados cuya resistencia a la tracción es la media de las correspondientes a los estados de dígitos pares adyacentes.

1.3. Tercera cifra (x) en la subdivisión del estado H

Las siguientes tres cifras a la letra H sirven para todas las aleaciones forjables:

H (x)11: Aplicado a los semi-productos que después de un recocido final mantienen un endurecimiento por deformación en frío que impide calificarlo como un estado recocido (0), pero no lo suficiente como para calificarlo como H(x)1. Ejemplo: El endurecimiento alcanzado por un enderezado por tracción controlada se denomina H111 (alargamiento de un 1% aproximadamente).

H 112: Aplicado a los semi-productos que pueden adquirir algún endurecimiento por deformación a elevada temperatura y por el cual hay unos límites de características mecánicas.

H 113: Aplicado a las chapas, que después de un recocido final mantienen un endurecimiento por deformación en frío que impide calificarlo como un estado recocido (0), pero no lo suficiente como para calificarlo como H(x) (el alargamiento es de un 3% aproximadamente).

2. SUBDIVISIÓN DE LOS ESTADOS T: TRATAMIENTO TÉR

Las cifras del 1 al 10 que siguen a la letra "T" indican las secuencias específicas de los tratamientos básicos como se verá a continuación.

T1: Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión y maduración natural

Aplicado a los semi-productos, que desde la temperatura de extrusión reciben un enfriamiento a velocidad suficiente (temple), de manera que con una maduración natural posterior, se incrementan sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del enfriamiento son sometidos a un aplanado

o enderezado por tracción sin efectos sensibles sobre las propiedades mecánicas.

T2: Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión, acritud y maduración natural

Aplicado a los semi-productos que después de un enfriamiento a velocidad suficiente (temple) desde la temperatura de extrusión (o laminación) reciben una acritud determinada seguida de un madurado natural con objeto de mejorar su resistencia mecánica. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efectos sobre las propiedades mecánicas.

T3: Tratamiento térmico de solución (1), temple (1), acritud y madurado natural

Aplicado a los semi-productos que después de un tratamiento de solución o temple, reciben una acritud determinada seguida de una maduración natural con objeto de mejorar su resistencia mecánica. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efecto sobre sus propiedades mecánicas.

T4: Tratamiento térmico de solución (1), temple (1), y maduración natural

Aplicado a los semi-productos que después de un tratamiento de solución, temple y maduración natural mejoran sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción sin efecto sobre las propiedades mecánicas.

T5: Tratamiento térmico de temple desde la temperatura de extrusión y maduración artificial

Aplicado a los semi-productos que desde la temperatura de extrusión reciben un enfriamiento con aire forzado a velocidad suficiente (temple), de manera que con una maduración artificial posterior se incrementan sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del enfriamiento son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción, sin efectos sensibles sobre las propiedades mecánicas.

T6: Tratamiento térmico de solución (1), temple (1) y maduración artificial

Aplicado a los semi-productos que después de un tratamiento de solución temple brusco y maduración artificial mejoran sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción sin efecto sobre las propiedades mecánicas.

T7: Tratamiento térmico de solución (1), temple (1) y sobre-maduración / estabilizado

Aplicado a los semi-productos que son madurados artificialmente después del tratamiento de solución y temple, más allá del límite correspondiente a la máxima resistencia con el fin de controlar alguna característica significativa.

T8: Tratamiento térmico de solución (1), temple (1), acritud y maduración artificial

Aplicado a los semi-productos que reciben una acritud determinada entre el temple y la maduración artificial para mejorar su resistencia. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efecto sobre las propiedades mecánicas.

T9: Tratamiento térmico de solución (1), temple (1), maduración artificial y acritud

Aplicado a los semi-productos que son deformados en frío después del tratamiento de solución, temple y maduración artificial, para mejorar su resistencia mecánica.

T10: Tratamiento térmico de temple desde temperatura de extrusión, acritud y maduración artificial

Aplicado a los semi-productos que después del enfriamiento (temple) y antes de la maduración artificial reciben una acritud determinada.

2.1 Segunda cifra en la subdivisión del estado T

Una segunda cifra añadida (no debe ser 0), indica variaciones en el tratamiento que alteran de forma significativa las propiedades de los semi-productos. Como más significativos se relacionan los siguientes:

T31: Tratamiento térmico de solución, temple, y acritud del 1%.

T41: Tratamiento térmico de solución y temple con refrigerante a temperatura.

T35: Tratamiento térmico de solución, temple y tracción controlada del 1,5 al 3%.

T36: Tratamiento térmico de solución, temple y acritud del 7%.

T42: Tratamiento térmico de solución a partir de 0 ó F, temple y maduración natural.

T62: Tratamiento de solución a partir de 0 ó F, temple y maduración artificial.

T51, T52, T53, T54: Enfriamiento (temple) desde la temperatura de extrusión con diferentes grados de enfriamiento, de manera que con una misma maduración artificial se consiguen características mecánicas finales diferentes.

T53: Enfriamiento, (temple), desde la temperatura de extrusión y doble maduración artificial.

T61: Tratamiento térmico de solución, temple y maduración artificial en condiciones diferentes a la T6.

T72: Tratamiento de estabilizado a partir de T42.

T73: Tratamiento térmico de solución, temple, y maduración con doble tratamiento (estabilización para mejorar la resistencia a la corrosión bajo tensiones y maduración).

T74: Tratamiento térmico de solución, temple en agua a temperatura superior a 50°C y maduración con doble tratamiento (Estabilizado + Maduración).

T76: Tratamiento térmico de solución, temple, y maduración con doble tratamiento (Estabilización para mejorar la resistencia a la corrosión exfoliante + Maduración).

T81: Tratamiento térmico de solución, temple, endurecimiento por deformación y maduración artificial. El endurecimiento por tracción del 1,5% al 3%.

T83: Similar al T8 para aleación Simagaltok 63/EN AW 6063.

T86: Tratamiento térmico de solución, temple, acritud y maduración artificial. La acritud proviene generalmente de un enderezado por tracción del 6%.

T87: Tratamiento térmico de solución, temple, endurecimiento por deformación y maduración artificial. La acritud proviene generalmente de un enderezado por tracción del 7%.

T89: Tratamiento térmico de solución, temple y endurecimiento suficiente para lograr las características mecánicas y maduración artificial.

T93, T94: Tratamiento térmico de solución, temple y endurecimiento suficiente para lograr las características mecánicas.

2.2 Tercera cifra (x) en la subdivisión del estado T

La tercera cifra añadida indica eliminación de tensiones mediante enderezado por tensión controlada, así:

T(x)51: Aplicado a los semi-productos que después del tratamiento térmico de solución y templado, indica la acritud que reciben de un último enderezado por tracción controlada del 1 al 3%. Estas barras no serán sometidas a posteriores enderezados.

T(x)50: Igual que el anterior pero aplicado a barras, perfiles, tubos extruidos y estirados: Porcentaje acritud enderezado por tracción controlada del 3%, menos el tubo de 0,5 al 3%.

T(x)511: Igual que el anterior pero se admite un estirado menor después de la tracción controlada.

Según los tipos de tratamiento que se utilicen para endurecer el aluminio, éstos se pueden clasificar en dos grupos:

- **Aleaciones no templables, con endurecimiento por acritud.**
- **Aleaciones tratables, con endurecimiento estructural.**

ALEACIONES NO TEMPLABLES CON ENDURECIMIENTO POR ACRITUD

Son aquellas que sus características mecánicas dependen de las distintas formas de laminación o estirado y de recocidos intermedios o finales si es necesario. Su dureza está caracterizada por el estado H y corresponden a las familias, 1000 (Aluminio puro), 3000 (Aluminio Manganeso), 4000 (Aluminio-Silicio) y 5000 (Aluminio Magnesio).

La acritud es el endurecimiento obtenido por deformación plástica en frío que produce un aumento de las características mecánicas y de la dureza del material. Se produce simultáneamente una disminución de su capacidad de deformación y una pérdida de maleabilidad. Este efecto es mucho más marcado cuanto mayor es la deformación sufrida o cuando más elevada es la tasa de acritud. También depende de la composición del metal.

Así la aleación 5083 (Magnealok 45) que contiene entre el 4 y el 4,9% de Magnesio, tiene unas características mecánicas más elevadas pero una aptitud a la deformación más limitada que la aleación 5754 (Magnealok 30) que contiene entre el 2,6 y el 3,6% de Magnesio.

El endurecimiento por acritud es un fenómeno que se produce en cualquiera de los modos de deformación utilizados: Laminado, estirado, plegado, martilleado, cintrado, embutido, entallado, etc.

Después del endurecimiento por acritud es posible recuperar o restaurar la aptitud a la deformación de un metal agrio por un tratamiento de «**recocido**». Este tratamiento se efectúa a una temperatura superior a 300°C. La dureza

y las características mecánicas de este metal comienzan a disminuir lentamente, esto es la «**restauración**» del material para finalmente obtener un valor mínimo correspondiente a las características mecánicas del metal en estado natural.

En el recocido se produce de una modificación de la textura y del tamaño de grano del metal que es posible observar por microscopio óptico de 50 aumentos. La textura evoluciona de una estructura laminar a otra completamente cristalizada. Durante la fase de recristalización y en el momento del recocido, el tamaño de grano es susceptible de crecer. Este efecto se pone de manifiesto durante un conformado, por ejemplo, un plegado, por el aspecto de piel de naranja que presenta la superficie del metal.

El aumento del tamaño del grano, por encima de un valor alrededor de 100 micras, reduce la capacidad de deformación de las aleaciones de aluminio.

Para evitar el crecimiento del grano y conservar una estructura de grano fino del metal recocido, hay que respetar las siguientes condiciones:

- 1º Asegurarse que el metal ha sufrido un índice de deformación suficiente, correspondiente a una disminución relativa de la sección de al menos un 15%. Es la acritud crítica, si no se cumple esta condición, hay que limitarse a un tratamiento de recocido sin permitir la recristalización.
- 2º Adoptar una velocidad rápida de aumento de la temperatura: de 20° a 60° C por hora.
- 3º Limitar el nivel de temperatura al intervalo de 350° a 380° C.
- 4º Limitar a dos horas máximo la duración de mantenimiento a temperatura.

Para las aleaciones de la familia 5000 (Aluminio-Magnesio), 5005, 5050, 5251, 5052, 5754, 5454, 5086, 5083 y 5056, los recocidos se hacen habitualmente en un intervalo entre 345° y 380° C, con una duración de 30 a 120 minutos.

ALEACIONES TEMPLABLES CON ENDURECIMIENTO ESTRUCTURAL

Las aleaciones de endurecimiento estructural son las que sus características mecánicas dependen de tratamientos térmicos tales como puesta en solución (o solubilización), temple y maduración (natural o artificial). A este grupo pertenecen las familias 2000 (Aluminio-Cobre), 6000 (Aluminio-Magnesio-Silicio), 7000 (Aluminio-Zinc) y 8000 (Aluminio-Otros). Estas aleaciones con endurecimiento estructural se obtienen según la secuencia de los tratamientos térmicos siguientes:

- Puesta en solución.
- Temple.
- Maduración (natural o artificial).

En ciertos casos pueden ser completados con estirado en frío en determinada fase del tratamiento.

PUESTA EN SOLUBILIZACIÓN

Se hace a temperatura elevada del orden de 530° C para las aleaciones de la familia 6000 (Simagaltok/Al-Mg-Si). Esta temperatura es más elevada cuando la aleación está cargada de los elementos aleantes; magnesio y silicio. La duración de mantenimiento a temperatura depende del espesor de los productos.

Durante el mantenimiento prolongado a temperaturas elevadas, los compuestos intermetálicos del tipo Mg₂Si para las aleaciones de la serie 6000, de tipo Al₂Cu para los de la familia 2000, se redisuelven y la aleación forma entonces una solución sólida homogénea.

La temperatura de puesta en solución de las aleaciones de aluminio de endurecimiento estructural deben ser reguladas con precisión para no alcanzar la de las eutécticas. Para las temperaturas eutécticas se produce una fusión local de los compuestos intermetálicos y de los eutécticos (aleaciones con punto de fusión bajo). El metal es entonces inutilizable. Según su composición, esta temperatura se sitúa entre 555° y 620° C para las aleaciones de la familia 6000.

TEMPLE

Se trata de un enfriamiento muy rápido del metal que se hace normalmente por inmersión o ducha en agua fría a la salida del horno en la laminación o en la prensa de extrusión, cuando el temple se hace a la salida de la hilera. El enfriamiento brutal del metal tiene por efecto impedir la precipitación de los compuestos intermetálicos.

Es inmediatamente después del temple cuando las aleaciones de endurecimiento estructural (AlCu-AlMgSi-AlZn) son fácilmente deformables. La velocidad de temple es un parámetro muy importante del que dependen ciertas propiedades, como son las características mecánicas de tracción, la tenacidad, el comportamiento a la corrosión..., existe para cada aleación una velocidad crítica de temple bajo cuyo umbral no se debe bajar.

Para obtener la tenacidad máxima la velocidad de temple debe ser tres veces más rápida que la velocidad crítica de temple. Observación: el temple es susceptible de producir tensiones internas sobre todo en las piezas de formas complejas o de grandes secciones.

Se puede disminuir las tensiones con una deformación plástica controlada, por ejemplo, una tracción con el 2% de alargamiento después del temple y antes de la maduración bien natural (T451) o artificial (T651).

REVENIDO O MADURACIÓN

Después del temple la solución sólida sobresaturada está en un estado metaestable. La vuelta al equilibrio, es decir la precipitación de los compuestos intermetálicos que provocan el endurecimiento estructural, se puede hacer de dos maneras:

- Por maduración a temperatura ambiente (maduración natural). Después de un reposo de varias horas, que depende de las aleaciones, la dureza y las características mecánicas no aumentan. La precipitación y el endurecimiento estructural han terminado. Es el estado T4.
- Por revenido, es decir un calentamiento de varias horas entre 160 y 180° para la serie 6000. El revenido (maduración artificial) acelera la precipitación. Se realiza inmediatamente después del temple. Las condiciones del revenido dependen de las aleaciones.

TEMPLE EN PRENSA DE LAS ALEACIONES DE LA SERIE 6000

Las aleaciones de la familia 6000, tales como la 6005 A, 6060, 6061, 6063, 6082, 6101, 6351, pueden ser templadas inmediatamente a la salida de la prensa por enfriamiento al aire soplado o por una ducha de agua. A la salida de la prensa (alrededor de 530° C aprox.) los perfiles están a una temperatura superior a la de la precipitación. Los productos así templados pueden ser utilizados en el estado designado como T1 o sufrir un revenido después del temple sobre la prensa.

Esta forma de proceder presenta diversas ventajas:

- Suprime el calentamiento para la puesta en solución.
- Reduce el riesgo de formación de tamaño de grano en la zona cortical, muy corroída por la extrusión.
- Conserva una textura no recristalizable, por lo tanto se consiguen mejores características mecánicas.
- Evita las deformaciones geométricas.

Las condiciones de temple en la prensa deben ser adaptadas a las temperaturas críticas de temple de las aleaciones, al espesor y a la geometría del producto. El espesor límite depende de la aleación.

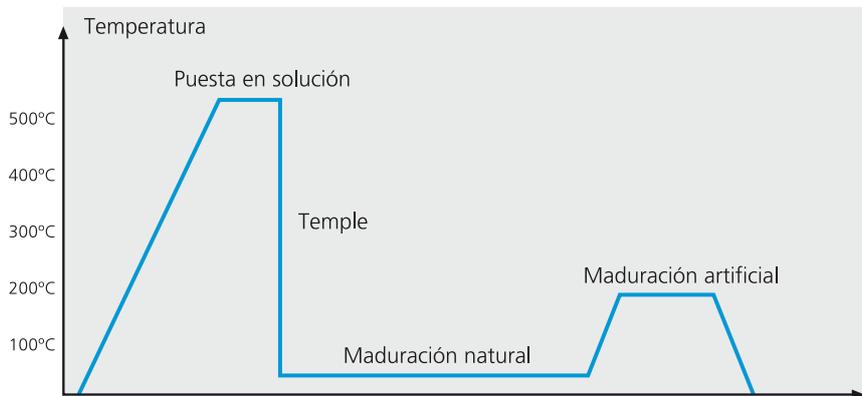
REPRESENTACION DEL TRATAMIENTO DE ENDURECIMIENTO ESTRUCTURAL

Este tratamiento comporta las secuencias siguientes:

- Puesta en solución
- Temple
- Maduración natural (a temperatura ambiente)
- Revenido o maduración artificial

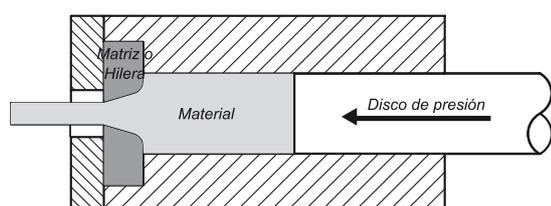
Tratamiento de puesta en solución

El tratamiento de puesta en solución sólida consiste en disolver en el metal base, por un mantenimiento a temperatura elevada, los elementos de la aleación que se encuentran en fases separadas. Por enfriamiento brutal de la solución sólida así obtenida, se obtiene un estado templado. La temperatura de puesta en solución óptima depende de la composición química de la aleación. La temperatura debe ser respetada en alrededor de $\pm 5^\circ \text{C}$, la duración del tratamiento depende de la composición química, tipo de producto, de las tasas de acritud antes del temple, etc.

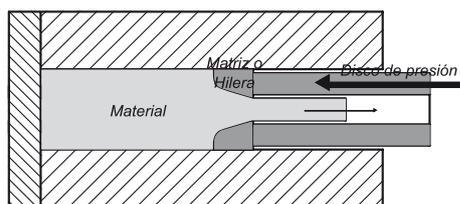


La extrusión en prensa es un procedimiento de conformación por deformación plástica, que consiste en moldear un metal por compresión en un recipiente obturado en un extremo con una matriz o hilera que presenta un orificio con las dimensiones aproximadas del producto que se desea obtener y por el otro extremo un disco macizo, llamado disco de presión.

Existen dos tipos de extrusión en función de la parte que realiza la compresión del material. Si dicho esfuerzo de compresión se transmite al metal mediante el disco de presión y contra la matriz se denomina extrusión directa. Si, por el contrario, es la propia matriz la que comprime el material haciendo que éste fluya por la misma, se denomina extrusión inversa.



Extrusión directa



Extrusión inversa

EXTRUSIONABILIDAD DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

La facilidad o dificultad de extrusión de un perfil se mide tomando como referencia la aleación EN AW 6060/6063 cuya utilización en este proceso es más habitual.

Aleación	Extrusionabilidad en %
1080	160
1050	135
1200	135
3003	120
6060-6063	100
6082	60
2011	35
5086	25
2014	20
5083	20
2024	15
7075	10

De esta información se deduce, entre otras, la facilidad o dificultad para obtener perfiles de secciones complejas.

Por una parte las aleaciones con alto índice de extrusionabilidad, por ser muy blandas y no poderse endurecer por tratamiento térmico, harían que los perfiles que se pudiesen obtener se deformaran en su manipulación, además de no poder mantener las formas del diseño.

En las aleaciones duras, su baja extrusionabilidad hace que el aluminio no fluya bien y por lo tanto no se puedan realizar perfiles de secciones complejas. Además de su baja productividad, este tipo de aleaciones requiere tratamientos térmicos de temple y maduración con un control muy estricto que hace también que en los perfiles de secciones sencillas el precio sea mayor.

ALEACIONES DE ALUMINIO DE EXTRUSIÓN

Todas las aleaciones de aluminio de deformación plástica son susceptibles de aceptar el proceso de extrusión y su empleo permite cubrir numerosos sectores y resolver problemas tan diferentes como los que se presentan en decoración, construcción mecánica, resistencia a la corrosión y a los agentes químicos, etc...

Desde el punto de vista de extrusión se distinguen tres clases de aleaciones:

1. ALEACIONES BLANDAS

■ No tratables térmicamente:

Aluminio puro: 1050, 1060, 1080, 1100, 1200, 1260, 1350

Aluminio-Manganeso: 3003, 3004, 3005, 3103, 3105

■ Tratables térmicamente:

Aluminio-Magnesio-Silicio: 6005, 6060, 6061, 6063, 6101, 6106, 6082

2. ALEACIONES SEMIDURAS

■ No tratables térmicamente:

Aluminio-Magnesio (3%): 5005, 5050, 5251, 5052, 5754

■ Tratables térmicamente:

Aluminio-Zinc: 7003, 7020

3. ALEACIONES DURAS

■ No tratables térmicamente:

A base de magnesio (3,5%): 5086, 5083, 5056

■ Tratables térmicamente:

Basándose en cobre y magnesio: 2014, 2017, 2024

Basándose en zinc, magnesio y cobre: 7049, 7075

POSIBILIDAD DE EXTRUSIÓN DE PERFILES

Límites actuales

Estos límites vienen marcados por la evolución de la tecnología de las prensas de extrusión. Actualmente existen prensas capaces de generar presiones de hasta 20.000 Tns. A su vez, las matrices pueden llegar a los 600 mm de diámetro permitiendo perfiles de sección continua de gran tamaño.

Nuestro amplio conocimiento de las fuentes de suministro a nivel nacional e internacional nos permite ofrecer a nuestros clientes soluciones a medida también en perfiles de grandes dimensiones.

Longitud de los perfiles

Los límites en cuanto a longitud de los perfiles extruidos viene marcado por varios factores que no siempre tienen relación con el propio proceso de extrusión. Por un lado, el tamaño de los billets o tochos de extrusión marcará el límite de longitud en función del peso del perfil. Por otro lado habría que tener en cuenta el tamaño de los hornos para el tratamiento posterior del perfil en caso de necesitarlo así como las dimensiones de las cubas o cabinas del acabado posterior que se le vaya a dar, bien sea anodizado o lacado.

Por último, el transporte también es un factor a tener en cuenta puesto que técnicamente es posible fabricar perfiles de hasta 28 metros de longitud.

Espesores mínimos

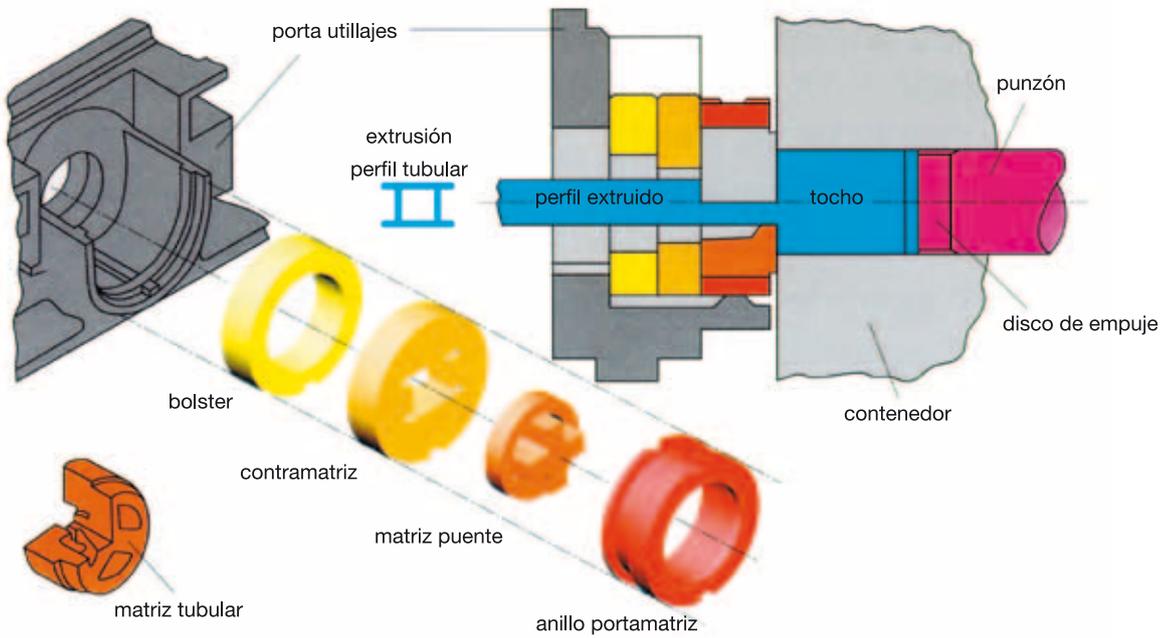
Según la sección del diámetro del círculo circunscrito del perfil, de su sencillez (aleaciones blandas o duras), de su forma semitubular y de su dificultad de enderezado (aleaciones blandas o duras) y perfiles tubulares (aleaciones blandas 1050, 5050, 6000), los espesores pueden variar entre 0,8 y 50 mm.

Ángulos vivos y radios

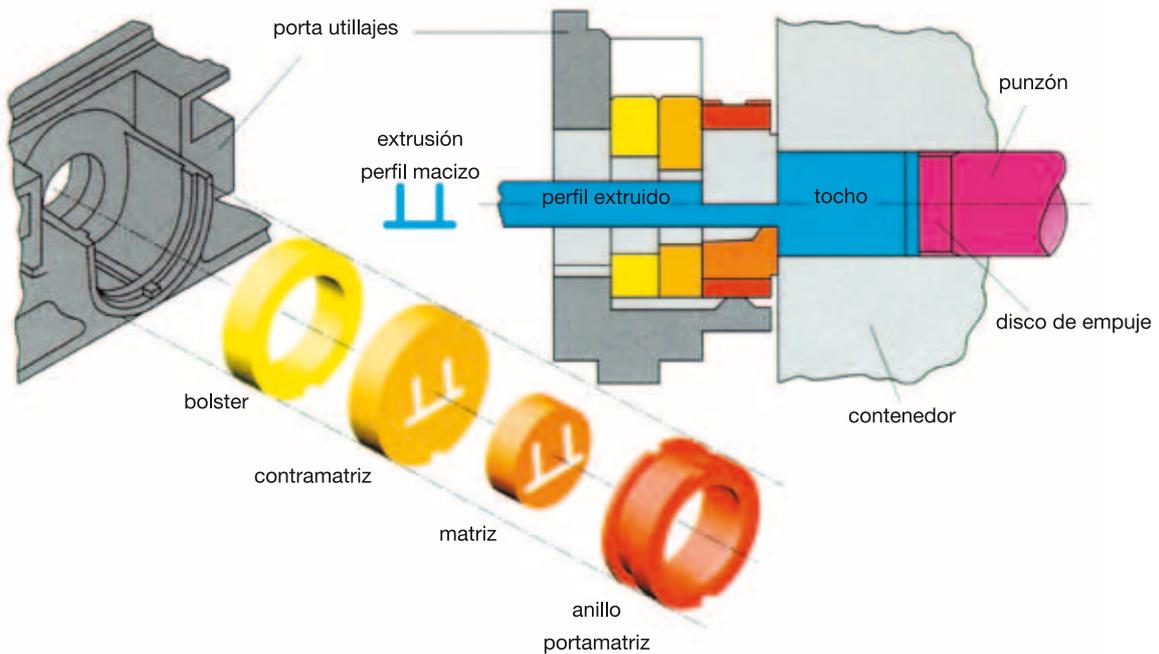
El ángulo vivo absoluto no existe en la extrusión. Lo que se designa frecuentemente bajo el nombre de "ángulo vivo" es en realidad un radio del orden de 0,5 mm. No es posible descender por debajo de este valor debido a la falta de fluidez del aluminio en dicha zona.

Cuanto más dura es la aleación a extruir, mayor es el riesgo de que se parta la herramienta y, en consecuencia, se recomienda el radio mínimo de 1 mm para las aleaciones: 5083, 5056, 2017, 2024, 6082, 7075, 7049, etc.

EXTRUSIÓN E HILERA DE UN PERFIL HUECO



EXTRUSIÓN E HILERA DE UN PERFIL MACIZO



El ambiente marino es un medio agresivo para la mayor parte de los materiales: metales, madera, plástico, etc. Los costos de mantenimiento son más elevados en unos que en otros.

Es por esto que se atribuyen mejores resultados a los productos llamados de «calidad marina» porque este «label» significa que su calidad ha sido comprobada en ambientes marinos, por eso existen pinturas marinas, bronce marino e igualmente, desde hace medio siglo, aleaciones de aluminio marino que tienen una excelente resistencia a la corrosión en medio hostil como es el marino.

LAS CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO MARINO

La agresividad del medio marino en contacto con los metales se debe a la abundancia de cloruros «Cl» en el agua del mar, con cantidades alrededor de 19 gramos por litro, bajo formas de cloruro de sodio, la sal, de cloruro de magnesio, etc. En efecto, en el medio marino es donde ellos se encuentran en equilibrio y está compuesto de:

- Sales minerales disueltas del orden de 30 a 35 gramos por litro.
- Gases disueltos de los cuales son de 5 a 8 ppm de oxígeno.
- Materias orgánicas en descomposición.
- Materias minerales en suspensión.

El conjunto constituye un medio muy complejo donde la influencia de cada factor de orden químico (la composición...) de orden físico (la temperatura, presión...), de orden biológico (la fauna...) sobre el comportamiento a la corrosión de los metales, no es realmente separable ni cuantificable independientemente.

La agresividad de la atmósfera marina es acentuada por la humedad y las salpicaduras constituidas por finas gotas de agua de mar importadas por el viento. El efecto de la atmósfera marina depende de la orientación y de la intensidad de vientos dominantes y se atenúan fuertemente a algunos kilómetros de la costa.

La salinidad varía de unos mares a otros, por ejemplo, los 8 gramos por litro en el Mar Báltico (lo que facilita su congelación), o los 41 gramos por litro en el Mar Mediterráneo, no tiene una influencia sensible en el comportamiento a la corrosión de las aleaciones de aluminio. Lo mismo ocurre con la temperatura del agua de mar en la superficie que varía según la estación y las latitudes, desde algunos grados centígrados en el Mar del Norte a los 25° C sobre los trópicos.

La experiencia demuestra que la resistencia a la corrosión es similar en los trópicos que en el Mar del Norte y aquí que en el Pacífico. Nada permite diferenciar el sólo hecho del medio marítimo al margen de elementos extraños que lo contaminan y que modifican localmente la composición del agua del mar o la atmósfera local así como los efluentes o emanaciones gaseosas. El conocimiento de los datos elementales

sobre la corrosión del aluminio y sus aleaciones en el medio marino, así como lo que respecta a algunas reglas, muy fáciles de aplicar, evitarán ciertos inconvenientes clásicos en el empleo del aluminio en el medio marino.

A este efecto hace falta recordar la importancia que tiene la capa de óxido natural en el comportamiento a la corrosión del aluminio y sus aleaciones. Se tratará a continuación de las formas de corrosión que se pueden observar en el medio marino incidiendo más en particular sobre la corrosión galvánica.

La finalidad de la capa de óxido de aluminio

El buen comportamiento a la corrosión del aluminio es debido a la presencia permanente sobre el metal de una capa de óxido natural constituido por óxido de aluminio

(Alúmina) que le hace pasivo a la acción del medio ambiente.

Aunque de muy pequeño espesor, comprendido entre 50 y 100 Angströms (o sea de 50 a 100 mil millonésimas de metro) la película de óxido constituye una barrera entre el metal y el medio ambiente y se forma instantáneamente desde que el metal entra en contacto con un medio oxidante: el oxígeno del aire, el agua, etc., la estabilidad físico-química de la capa de óxido por tanto tiene una gran importancia sobre la resistencia a la corrosión del aluminio. Ella depende de las características del medio, uno de los cuales es el pH y también la composición de la aleación del aluminio.

LA INFLUENCIA DEL pH

La velocidad de disolución de la capa de óxido depende del pH. Ésta es elevada en un medio ácido y en un medio alcalino pero es débil en los medios próximos a la neutralidad (pH 7). El agua de mar tiene un pH de 8 - 8,2. La capa de óxido es por tanto muy estable en el agua del mar y en el ambiente marino.

Contrariamente a una idea muy difundida, el pH no es sólo un criterio a tener en cuenta para predecir el comportamiento del aluminio en un medio acuoso: La naturaleza del ácido o de la base juegan un papel preponderante. Ésto es muy importante cuando se debe elegir un producto limpiador o decapante para el aluminio.

De este modo si los hidrácidos tales como el ácido sulfúrico atacan fuertemente al aluminio (tanto más si están en una solución concentrada), el ácido nítrico concentrado por el contrario no tiene acción sobre el aluminio, el contribuye por su función oxidante a reforzar ligeramente la capa de óxido y puede ser utilizado en una concentración superior al 50% para el decapado del aluminio y de sus aleaciones. Los ácidos orgánicos, sólo tienen una ligera acción sobre el aluminio. Es igualmente verdadero en un medio alcalino: la sosa cáustica, la potasa, atacan severamente al aluminio. El amoníaco concentrado tiene una acción mucho más moderada.

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ADICIÓN

Ciertos elementos de adición de las aleaciones de aluminio refuerzan las propiedades protectoras de la película de alúmina.

Otros por el contrario la debilitan. Por parte de las primeras hay que citar el magnesio cuyo óxido, la magnesia, se combina con la alúmina. La mejora de las propiedades protectoras de la película de óxido natural es lo que explica el rendimiento óptimo del comportamiento a la corrosión de las aleaciones de aluminio-magnesio de la familia EN

AW 5000 (Magnealtok) tales como la 5005 (Magnealtok 10), 5052 (Magnealtok 25), 5754 (Magnealtok 30), 5154 (Magnealtok 35), 5086 (Magnealtok 40) y la 5083 (Magnealtok 45).

Por el contrario, el cobre es uno de los elementos que debilitan las propiedades de la capa de óxido. Esta es la razón por lo que está totalmente desaconsejado utilizar en un ambiente marino, sin protección especial, las aleaciones de aluminio-cobre de la familia EN AW 2000 (Cobrealok 07-11-14-17 y 24) y las aluminio-zinc de la familia 7000 con adición de cobre.

FORMAS DE CORROSIÓN

Nosotros no citaremos aquí más que las formas de corrosión que pueden eventualmente encontrarse en el ambiente marino en la aleaciones de extrusión y laminación de las familias 1000 (Aluminio Puro), 3000 (Aluminio-Manganeso), 5000 (Aluminio-Magnesio) y 6000 (Aluminio-Magnesio-Silicio) y las aleaciones de moldeo con silicio o magnesio.

Corrosión uniforme

Este tipo de corrosión se traduce por una disminución del espesor regular y uniforme sobre toda la superficie del metal. La velocidad de disolución puede variar de unas micras por año, en un medio no agresivo a muchas micras por hora según la naturaleza del ácido o de la base de la solución en el agua. En ambiente marino, sea en inmersión en el agua o bajo los efectos de la atmósfera marina, la corrosión uniforme es ínfima. No es medible.

Corrosión por picaduras

Esta es una forma de corrosión muy localizada y común a muchos metales. Consiste en la formación de cavidades en el metal, en las cuales la geometría, varía según cierto número de factores inherentes al metal (naturaleza de la aleación, condiciones de fabricación...) o al medio: concentración de sales minerales, etc.

El aluminio es sensible a la corrosión por picaduras en los medios donde el pH está próximo a la neutralidad, es decir, de hecho en todos los medios naturales: aguas superficiales, aguas de mar, humedad del aire, etc.

Contrariamente a los otros metales usuales, esta forma de corrosión llama la atención porque las picaduras de corrosión están siempre recubiertas de pústulas blancas de alúmina hidratada gelatinosa $Al(OH)_3$ muy voluminosas. El volumen de la pústula es más importante que la cavidad subyacente.

La corrosión por picaduras se desarrolla en sitios donde la capa de óxido natural presenta defectos: reducciones de espesor, roturas locales, lagunas, etc. provocadas por diversas causas relacionadas con las condiciones de transformación o defectuoso manipulado y con los elementos de aleación, etc. La experiencia demuestra que las zonas lijadas, rayadas en las operaciones de calderería, de plegado, de soldadura, son lugares donde las picaduras pueden desarrollarse durante las primeras semanas de inmersión en el agua de mar.

Lo que interesa al usuario, es conocer la velocidad de penetración de las picaduras donde se han iniciado. Contrariamente a otros metales cuyos productos de corrosión son solubles, es el caso del zinc, los del aluminio, la alúmina $Al(OH)_3$, son insolubles en el agua, si bien una vez formados, permanecen fijados al metal en las cavidades de la picadura. La alúmina hidratada frena considerablemente los cambios entre el agua de mar o la humedad del aire y el metal.

La velocidad de corrosión por picaduras del aluminio y de sus aleaciones decrece por tanto muy rápido en la mayor parte de los medios incluso en el agua del mar. Las medidas de penetración de las picaduras hechas a intervalos regulares demuestra que la velocidad de ataque de la picaduras está ligada al tiempo por una relación del tipo $V = Kt^{1/3}$.

La gran experiencia en el empleo del aluminio no protegido en la construcción al borde del mar (techos, cubiertas, etc.) y en la construcción naval, confirma los resultados obtenidos en laboratorio o en exposición natural de la corrosión durante mucho tiempo: La profundidad de las picaduras una vez formadas durante los primeros meses, no sigue evolucionando. Esta ralentización de la velocidad de corrosión por picaduras, explica que se puedan utilizar productos de aluminio en algunos medios naturales (atmósfera rural, atmósfera marina, agua de mar, etc.) sin ninguna protección durante decenios.

La corrosión se produce tanto en atmósfera marina como en inmersión en agua de mar. Tanto en un caso como en el otro, la profundidad de las eventuales picaduras rara vez sobrepasa el milímetro después de varios años.

El aluminio, para protegerse de la acción de los agentes atmosféricos, se recubre de forma natural de una delgada película de óxido, esta capa de Al_2O_3 tiene un espesor más o menos regular del orden de 0,01 micras sobre el metal recientemente decapado y puede llegar a 0,2 ó 0,4 micras sobre metal que haya permanecido en un horno de recocido.

Para poder soldar es necesario eliminar previamente, por procedimientos químicos o mecánicos, dicha capa.

Se pueden obtener películas de óxido artificialmente mucho más gruesas y de características distintas a las de la capa natural, más protectoras, por procedimientos químicos y electrolíticos. El proceso de anodizado permite formar capas en las que el espesor puede, a voluntad, ser de algunas micras a 25/30 micras en los tratamientos de protección o decoración, llegando a las 100 micras y más por procesos de endurecimiento superficial, esto es el anodizado duro.

PRINCIPIO DEL ANODIZADO

Si se llena una cuba con agua hecha conductora por la adición de una pequeña cantidad de ácido, de base o de sal y si en este electrolito, se dispone de un cátodo (polo negativo), inatacable (níquel o plomo) y un ánodo de aluminio, se observa un desprendimiento de hidrógeno en el cátodo y ningún desprendimiento en el ánodo.

Se observa, por otra parte, que el ánodo de aluminio, se ha recubierto de una película de alúmina. El oxígeno procedente de la disociación electrolítica del agua ha sido utilizado para oxidar el aluminio del ánodo; de aquí la expresión «**Oxidación anódica**» anteriormente utilizada y sustituida actualmente por el término «**Anodizado**». La naturaleza del electrolito tiene una importancia capital sobre los fenómenos que se desarrollan en la superficie anódica.

Se pueden señalar dos tipos de reacciones anódicas, que presentan variantes:

1º En los electrolitos que no tienen acción disolvente sobre la capa de óxido, se forma una película muy adherente y no conductora. El crecimiento de la película se realiza hasta que su resistencia eléctrica es tan elevada que impide la circulación de la corriente hacia el ánodo. Se forma entonces una capa llamada «capa barrera».

2º En los electrolitos que tienen una acción disolvente sobre la capa de óxido, si el metal mismo es disuelto y si los productos de reacción son solubles en el electrolito, no se forma capa de óxido. **El procedimiento de anodizado, en medio sulfúrico es el más utilizado debido a las condiciones económicas de explotación, a los resultados satisfactorios que se obtienen y a los medios a utilizar para obtenerlos.**

La naturaleza del metal base (aluminio no aleado de diversas puresas y aleaciones) tiene una importancia capital sobre los resultados que se consiguen y los medios a utilizar para obtenerlos.

1. EL MECANISMO DE OXIDACIÓN DISOLUCIÓN

Es necesario recordar de la teoría de formación de capas de óxido porosas, los dos factores esenciales siguientes:

Primer factor:

Crecimiento de la capa de óxido del exterior al interior como consecuencia de un fenómeno electro-químico puro, de donde resulta una cierta velocidad de oxidación V_o .

Segundo factor:

Disolución de la capa de óxido a la medida que se forma por un fenómeno puramente químico (naturalmente, relacionado con el fenómeno eléctrico), de donde resulta una cierta velocidad de disolución V_d .

2. FORMACIÓN DE CAPAS POROSAS

Si se oxida una pieza de aluminio en una solución que tenga una acción disolvente sobre la capa de alúmina, se observa que la intensidad de la corriente, para una tensión determinada, disminuye muy rápidamente pero se estabiliza en seguida a un nivel más elevado. Después de los primeros segundos de la electrólisis, se forma una verdadera capa barrera, la cual tiende hacia el valor límite de 14 A/V.

El óxido formado en este estado consiste en una alúmina anhidra, en estado amorfo (Al_2O_3) habiéndose descubierto en los últimos tiempos que esta capa está constituida por un apilamiento de células hexagonales yuxtapuestas, en las que, precisando más, el centro será de alúmina amorfa poco resistente a los ácidos, mientras que la periferia está formada por alúmina cristalina muy resistente a los ácidos. Aparecen entonces en la superficie de la capa barrera, una multitud de puntos de ataque como consecuencia del efecto de disolución de la película por el electrolito que se produce en el centro de las células de alúmina y que constituye el comienzo de los poros.

Cada punto de ataque puede ser considerado como una fuente de corriente a partir de la cual se va a desarrollar un campo de potencial esférico; los iones que se presentan a la separación óxido, suministran el oxígeno nascente que transforma en óxido la porción de esfera de metal correspondiente; simultáneamente, la acción de disolución continúa manifestándose en la base del poro, tendiendo a disminuir el espesor de la capa barrera en que se prolonga; el poro se ahonda, los iones penetran preferencialmente, producen calor y tienden a favorecer la disolución, produciendo así un frente de avance hemisférico de la célula que se desarrolla, por lo tanto, del exterior al interior del metal a partir del fondo de los poros.

SISTEMAS DE ANODIZADO

Entre los diferentes sistemas de anodizado seleccionamos destacamos dos de los más comerciales: anodizado de protección y anodizado duro.

1. ANODIZADO DE PROTECCION

El esquema de un proceso de anodizado partiendo de un perfil o una chapa podríamos representarlo siguiendo los siguientes pasos:

1º Preparación superficial del material a base de:

- a/ Pulido con cepillo de algodón
- b/ Lijado con bandas de lija
- c/ Gratado con cepillo metálico
- d/ Otros tipos de pulido

2º Desengrase

- a/ ácido para el esmerilado, gratado, etc.
- b/ alcalino para el pulido

3º Lavado con agua en circulación y con continua regeneración.

4º Decapado de limpieza (con sosa cáustica al 5% en agua a 45-50° C) o decapado para acabado mate directo o pulido químico o pulido electrolítico.

5º Lavado con agua en circulación y con continua regeneración.

6º Neutralizado (ácido nítrico 60°Be al 50% en agua a temperatura ambiente)

7º Lavado con agua en circulación y con continua regeneración.

8º Oxidación anódica (ácido sulfúrico al 20% en agua con temperatura a 19-20° C y corriente continua a 1,5 A/dm²)

9º Lavado con agua en circulación y con continua regeneración.

10º Coloración. Por su estructura porosa, la capa de óxido formada en medio sulfúrico se asemeja a las fibras textiles y puede, al igual que éstas, ser teñida por medio de colorantes especiales derivados de los colorantes de la industria textil. Como la capa es transparente, el brillo del metal base se transmite y pueden obtenerse aspectos que ningún otro tratamiento por pintura o barniz es susceptible de igualar. Los colorantes utilizados para el coloreado del aluminio pueden ser orgánicos o minerales.

a/ Coloración orgánica, para este tratamiento pueden ser utilizados numerosos tipos de colorantes. Difieren especialmente en el mecanismo de absorción. La mayor parte son absorbidos por capilaridad. Son éstos en particular, los grupos de **colorantes ácidos** y de colorantes llamados **sustantivos**, como los de alizarina y los colorantes de índigo.

Otros dan lugar a una combinación química con el aluminio, como los colorantes a base de complejos metálicos, los colorantes diazo y los colorantes básicos. Estos últimos exigen ser tratados con sustancias colágenas y son poco utilizados porque su resistencia a la luz es débil.

Se emplea para aplicaciones generales que se quieran colorear y que no estén expuestas a la intemperie.

b/ Coloración electrolítica, para este tratamiento se utilizan óxidos metálicos, que se fijan en las porosidades de la capa de óxido y son muy resistentes a la luz y al calor.

Empleada en aplicaciones generales que requieran colores sólidos y que vayan a estar a la intemperie.

11º Lavado con agua en circulación y con continua regeneración.

12º Colmatado o Fijado. La experiencia demuestra que una capa de óxido de 20 micras formada sobre aluminio y no colmatada, desaparece en unas horas en una solución decinormal de ácido nítrico. La misma capa perfectamente colmatada no experimenta ninguna pérdida prácticamente después de 1200 horas de inmersión. En realidad, una de las características principales de la alumina formada en el colmatado o fijado es su resistencia a los ácidos.

Para aplicaciones en arquitectura, es indispensable colmatar en agua muy pura. Prácticamente con agua desmineralizada y hasta desionizada. El procedimiento más utilizado para la desmineralización es el intercambio aniónico y catiónico con resinas especiales cambiadoras de iones. Se trata de conseguir un doble cambio de iones (instalación de dos cuerpos) y no de un simple ablandamiento del agua que, por transformación de los elementos insolubles en sales solubles, corre el peligro de producir cuerpos nocivos para la calidad del colmatado o fijado. La temperatura del agua viene dada por la temperatura de ebullición (en la práctica 97 a 100° C) con el fin de que se produzca la hidratación de forma muy lenta al contacto con las moléculas de agua a baja temperatura. El pH del baño es aconsejable mantenerlo entre 5,5 y 6,5. El reajuste se hace por medio de sosa, carbonato de sosa o ácidos sulfúricos, acéticos y bóricos.

2. ANODIZADO DURO

Con el anodizado pueden obtenerse capas considerablemente más duras que las clásicas (y en particular más duras que las que se obtienen en medio sulfúrico-oxálico) en un medio sulfúrico puro, con la condición de que los porcentajes de disolución sean reducidos a un valor extremadamente pequeño, lo suficiente para permitir el paso de los iones en los poros, que se convierten en finísimos canales. Se obtienen estos resultados anodizando a muy baja temperatura (0° C) en un medio electrolítico de 10 a 15% de ácido sulfúrico, con una densidad de corriente fuerte (3 A/dm²). La tensión, que será al principio de 10 V puede llegar a ser de 80 a 100 V según la naturaleza de la aleación. Es necesario un enérgico agitado con una refrigeración eficaz. Se pueden obtener así capas muy espesas a una velocidad de 50 micras / hora. Las capas que actualmente se consiguen son de alrededor de 150 micras, según el proceso y la aleación. La dureza de estas capas es comparable a la del cromo-duro, su resistencia a la abrasión y al frotamiento es considerable. Su utilización para piezas mecánicas se extiende cada vez más debido al mayor conocimiento del aluminio, de sus características mecánicas y de sus nuevas aplicaciones. Puesto que se trata, en general, de piezas cuyas tolerancias dimensionales son estrechas, es necesario tener en cuenta, en el mecanizado, el crecimiento de las cotas, que llega a ser del 50% del espesor efectivo de la capa.

Todas las aleaciones son susceptibles del anodizado duro, salvo las que contienen cobre, porque éste tiende a disolverse a pesar de la baja temperatura y perturba el tratamiento.

Las capas duras se obtienen a costa de una merma de flexibilidad, que limita en su utilización a aquellas aplicaciones en que no vayan a sufrir choques térmicos importantes, porque la película se rompería bajo el efecto de las dilataciones fuertes.

Estas capas no son susceptibles de ser colmatadas (fijadas) con agua hirviendo por las mismas razones. Pueden, por el contrario, ser impregnadas de cuerpos grasos y lubricantes.

Propiedades del anodizado duro:

Entre otras podemos destacar las siguientes:

- **Resistencia a la abrasión** ya que la alúmina es un cuerpo extremadamente duro, un poco menos que la del diamante. Lo que permite que tenga una resistencia al desgaste superficial superior a muchos tipos de acero.
- **Resistencia eléctrica.** La alúmina es un aislante eléctrico de calidad excelente, superior a la de la porcelana, este aislamiento depende de la porosidad; además, es muy afectado por la presencia de impurezas en el metal y se caracteriza generalmente por la medida de la tensión de ruptura.
- **Resistencia química.** La capa anódica protege eficazmente el metal base contra la acción de numerosos medios agresivos. Por este motivo se utiliza cada vez más en ambientes navales e industriales para proteger ciertas piezas contra la corrosión.

- **Porosidad** secundaria o apertura más o menos acusada en la entrada de los poros debido al efecto de disolución del baño, porosidad que se manifiesta, sobre todo, en la parte exterior de la película y se aprovecha en las técnicas de coloreado e impregnación.

Para conservar toda la capacidad de la alúmina, es necesario utilizar un electrolito de débil actividad química a temperaturas bajas con lo que se limita la redisolución de la película formada. El anodizado duro se aplica normalmente sobre aleaciones con contenidos limitados de aleantes. Permite obtener capas superiores a 150 micras con aleaciones de aluminio que contengan:

Hasta un 6% de Mg (Magnesio)
“ 5% de Cu (Cobre)
“ 8% de Zn (Cinc)
“ 13% de Si (Silicio)

Debido a la gruesa capa que se puede conseguir con este procedimiento, a la vez de las características mecánicas de la capa, se pueden recuperar piezas que por algún defecto se hayan desgastado.

Las aleaciones que tienen una buena aptitud para el anodizado están perfectamente definidas en las páginas correspondientes. Es muy importante a la hora de seleccionar el material para un anodizado duro, verificar la pieza que se vaya a mecanizar y seleccionar la aleación también en función de sus características y resistencia mecánica.

Las aleaciones de aluminio se sueldan al arco, bajo atmósfera inerte (argón, helio o una mezcla de los dos) y hay dos técnicas:

1. SOLDADURA AL ARCO BAJO ATMÓSFERA INERTE CON ELECTRODO REFRACTARIO O PROCEDIMIENTO TIG (Tungsténe Inert Gas)

En este procedimiento se hace saltar un arco eléctrico entre un electrodo refractario de tungsteno y la pieza a soldar, mientras que un chorro de gas inerte, generalmente argón, rodeando el electrodo, protege el baño de fusión contra la oxidación. Una varilla de aportación sujeta con la mano alimenta el baño de fusión. Este procedimiento utiliza una fuente alimentada por corriente alterna estabilizada por HF específicamente concebida para la soldadura de las aleaciones de aluminio. Se utiliza en espesores comprendidos entre 1 y 6 mm y se puede robotizar.

2. LA SOLDADURA AL ARCO BAJO ATMÓSFERA INERTE CON ELECTRODO CONSUMIBLE O PROCEDIMIENTO MIG (Metal Inert Gas)

En este procedimiento de soldadura, el aluminio o la aleación de aluminio sirve a la vez de electrodo y de metal de aportación. Se suministra en hilo previamente enrollado en una bobina, el cual se desenrolla automáticamente hasta la herramienta de soldadura, pistola, a medida que se consume. La energía para la soldadura se suministra por una fuente de corriente continua. La conexión se efectúa con polaridad inversa (-) en la pieza para asegurar a la vez el decapado y la fusión del hilo del electrodo. Este procedimiento, utilizable para los productos con espesor superior a 2,5 mm., es igualmente automatizable. La versión manual de MIG se llama comúnmente soldadura semi-automática.

Desde hace algunos años, los constructores de material de soldadura proponen fuentes de corriente pulsante. Este equipo permite soldar espesores delgados de 1,5 a 4 mm. con mucha facilidad. Para los espesores medios y gruesos, su ventaja con relación a las fuentes clásicas no está demostrada.

MATERIALES DE APORTACIÓN

En la soldadura MIG se utilizan siempre materiales de aportación, mientras que en la soldadura TIG se puede o no utilizar. Las mejores propiedades de la junta soldada en lo que se refiere a la resistencia, corrosión y ausencia de fisuras, se obtiene cuando se usan materiales de aportación de acuerdo con la tabla que en otras páginas detallamos.

No existe una norma general para la elección de los materiales de aportación debido al tipo de utilización y al parámetro que interese más en cada caso. Las de alto contenido en magnesio AlMg5 (EN AW 5356-5556) dan mayor resistencia, mientras que la de AISi5 (EN AW 4043) es más resistente a la fisuración y proporciona mejor flujo de metal durante el

proceso de fusión de las aleaciones templables. Este tipo de aleaciones (AlCu -

AlMgSi - AlZn), no se deben soldar con material de aportación del mismo grupo de aleación por el proceso de fisuración. En el caso de que el material se vaya a anodizar posteriormente a la soldadura, se evitará el material de aportación AISi5 porque cogerá en la zona de soldadura un color muy oscuro. Con el fin de reducir el peligro de la corrosión bajo tensión y aumentar la resistencia, se ha añadido Cu a las aleaciones de AlZnMg. Al hacer esto también empeora la soldabilidad. Diversas investigaciones señalan que se puede añadir como máximo 0,2% de Cu, antes de que el peligro de fisuración en caliente aumente considerablemente. Se elige en este caso el AISi5 (EN AW 4043).

LIMPIEZA ANTES DE SOLDAR

La limpieza antes de la soldadura es esencial para conseguir buenos resultados. La suciedad, aceites, restos de grasas, humedad y óxidos deben ser eliminados previamente, bien sea por medios mecánicos o químicos. Para trabajos normales de taller se puede elegir el siguiente procedimiento:

1. Eliminación de la suciedad y desengrasado en frío con alcohol o acetona.
2. Lavar con agua y secar inmediatamente para evitar el riesgo de oxidación.
3. Eliminación mecánica mediante:
 - Cepillado con un cepillo rotativo inoxidable.
 - Raspado con lija abrasiva o lima.
 - Por chorreado.

Cuando hay demandas más exigentes respecto a la preparación, se puede realizar una limpieza química según el esquema siguiente:

- Eliminación de la suciedad.
- Desengrasado con percloroetileno a 121 °C.
- Lavado con agua y secado inmediato.
- Eliminación del óxido de aluminio de la siguiente forma:
 - Limpieza alcalina con p.e. NaOH.
 - Limpieza ácida con p.e. $\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{HF}$.
 - Lavado con agua y secado inmediato.
 - Neutralización con HNO_3 (después del tratamiento con NaOH).
 - Baño en agua desionizada.
 - Secado inmediato con aire caliente.

Los métodos químicos requieren equipos costosos para el tratamiento superficial y no se pueden usar siempre por esta razón. Sin embargo no se debe nunca prescindir de la eliminación del óxido o el desengrasado en el área de soldadura.

ATMÓSFERA CONTROLADA

Como gases de protección para la soldadura MIG y TIG, se usan siempre los gases inertes Argón y Helio. Durante la soldadura el gas inerte enfría la boquilla de soldadura y protege, al mismo tiempo, al electrodo y al baño de fusión.

El gas también participa en el proceso eléctrico en el arco. Los gases comerciales que generalmente se usan son los siguientes:

- Argón, pureza 99,95 %.
- Argón + Helio (30/70, 50/50) para soldadura MIG, da un baño de fusión más amplio y caliente.
- Helio para corriente continua. En la soldadura TIG proporciona una fusión más caliente y velocidad de soldadura mayor, pero es más caro y requiere mayor consumo.

El Argón puro es el gas que con mayor frecuencia se usa y se debe emplear en la soldadura normal de taller, puesto que es mucho más económico y requiere menor flujo de gas. El Helio se usa sólo cuando se exige mayor penetración, por ejemplo, en soldadura en ángulo o cuando se suelda un material muy grueso.

AMBIENTE

Cuando se suelda el aluminio, se producen diferentes tipos de humos y gases; lo mismo que en el caso de la soldadura de acero, con el fin de evitar la propagación de esta contaminación es aconsejable la instalación de extractores de humos y gases. La intensidad del arco es mucho mayor que en la soldadura de acero y bajo ningún concepto se debe mirar al arco sin una máscara de protección adecuada. La radiación ultravioleta (UV) intensa puede dañar los ojos y la piel, por lo cual el soldador de aluminio debe llevar ropa de protección que cubra todo el cuerpo. La cantidad de gas depende del método de soldadura, material de aportación y tipo de aleación. La soldadura TIG produce una cantidad de humo considerablemente menor que la soldadura MIG, debido al contenido menor de energía en el arco. En la soldadura MIG las cantidades mayores de humo se producen soldando aleaciones de AlZnMg con AlMg₅ (EN AW 5356-5556) como material de aportación. Por esta razón es necesaria una buena ventilación general en combinación con medidas individuales como máscaras de aire fresco o dispositivos de aspiración de humos local (In situ).

EL ARCO

El proceso eléctrico en el arco es de gran importancia para comprender lo que pasa en la soldadura de aluminio. En principio se puede soldar con corriente continua (CC) o con corriente alterna (CA). Si observamos primero la CC, podemos elegir entre dos casos de polaridades diferentes, polaridad negativa y polaridad positiva.

La polaridad negativa cede la mayor parte de su energía a la pieza de trabajo, 70 %, de modo que obtenemos un baño de fusión profundo, con buena penetración. La carga sobre el electrodo es reducida, lo cual es una ventaja en la soldadura TIG. Una gran desventaja, al emplear esta polaridad es que el arco rompe la película de óxido, de modo que se impone un tratamiento previo de material, como la preparación cuidadosa de los bordes, limpieza muy cuidadosa y bordes biselados.

En combinación con arco pulsado se puede soldar chapa fina desde 0,06 mm. La soldadura con corriente continua

y polaridad positiva (polaridad invertida) se usa para la soldadura MIG. Es típico que en la distribución de calor, el 70 % corresponda al electrodo. El baño de fusión es relativamente ancho y de escasa profundidad resultando en poca penetración.

La ventaja determinante para el uso de polaridad positiva consiste en el efecto rompedor de la película de óxido del arco, con tal eficacia, que dicha película ya no sea obstáculo para conseguir una buena calidad en la soldadura. El mecanismo para este efecto rompedor de la película de óxido no es completamente conocido, pero una explicación, es que se debe al bombardeo de la superficie de iones metálicos positivos análogo a la limpieza de superficies por chorreo.

Aunque el arco tiene esta propiedad no se debe prescindir de la eliminación del óxido antes de empezar la soldadura. El arco no es capaz de romper las películas de óxido gruesas formadas durante la laminación de chapas en caliente, sino sólo las capas finas que se forman después de la limpieza. La soldadura con corriente alterna (CA) implica que la polaridad se cambia aproximadamente 100 veces por segundo y, por lo tanto, se pueden considerar las propiedades de la soldadura con CA como el promedio entre los dos casos en la soldadura con corriente continua. La distribución del calor es casi la misma entre el electrodo y la pieza de trabajo; la penetración y ancho del baño de fusión cae entre los valores que rigen para los dos casos anteriores. El arco tiene todavía un efecto rompedor de la película de óxido. La corriente alterna se usa en la soldadura TIG normal con argón como gas protector. La corriente absorbida por el equipo se altera debido a la acción rectificadora del arco; por esta razón se ha diseñado una máquina para soldadura TIG que compensa este efecto.

SOLDADURA MIG

Para la soldadura MIG de aluminio se puede usar el mismo equipo que en la soldadura de aceros con CO₂. La capacidad de la fuente de energía se elige según la producción prevista. Para la soldadura de espesores de hasta 10 mm. es generalmente de 250-300 A. El sistema de alimentación debe ser con preferencia del tipo «push-pull», es decir, una combinación de efecto empuje-tiro, pero se pueden usar también tipos con efecto sólo de empuje para guías de hilo corto y diámetro de hilo de 1,6 mm. Debido a su menor resistencia, el aluminio permite el empuje en longitudes cortas. Sin embargo, aleaciones como las del grupo AlMg₅ (EN AW 5356-5556) son mucho más duras que las del grupo AlSi₅ (EN AW 4043) y la de aluminio puro Al 99,5 (EN AW 1050) permiten el empuje en longitudes mayores. En todo caso la longitud del conducto del hilo ha de ser siempre lo más corta posible, y en su trayecto, los radios de curvatura habrán de ser amplios evitando bucles y contornos pronunciados.

Deberá vigilarse periódicamente el estado de boquillas y conductos limpiándolos de viruta y restos de material en ellos depositados.

La soldadura MIG se lleva a cabo siempre con corriente continua (CC), con argón puro como gas de protección y es adecuada para todas las posiciones de soldadura, incluso sobre techo. La soldadura en posición vertical se hace siempre en sentido ascendente. La calidad de la soldadura es

generalmente alta pero el riesgo de porosidad es siempre mayor que en la soldadura TIG, pues debido a que el arco es autorregulado, temporalmente puede hacerse inestable, lo cual puede causar interferencias en la aportación de material. Este método es muy adecuado tanto para la soldadura manual como mecanizada, en espesores de 3 mm. o más. Los soldadores expertos pueden soldar material todavía más delgado. En el caso de que los requerimientos de la calidad de soldadura sean bajos, se pueden soldar materiales todavía más delgados, pero en este caso el arco no trabaja en el área de «spray» puro, debido al bajo voltaje, que induce a una tendencia de arco corto. La velocidad de soldadura es para la soldadura manual de 0,3 a 0,75 m./min. y para la soldadura robotizada de 2 a 3 m./min. Esta velocidad relativamente alta hace que el método sea más productivo que el TIG y en combinación con la densidad de energía alta en el arco, se obtiene una zona afectada por el calor (HAZ) más estrecha que en el TIG. Ese es un factor favorable ya que la deformación debido a la soldadura decrece cuando disminuye la aportación de energía calorífica. Los campos de aplicación del método MIG son muchos, lo que ha conducido al desarrollo y refinamiento de la técnica de la soldadura.

SOLDADURA POR PUNTOS MIG

La manera corriente de unir dos placas en una unión solapada, es mediante la soldadura de puntos por resistencia. Este método sin embargo, requiere una inversión elevada en maquinaria y se limita a espesores de hasta 4 mm. Como método alternativo se puede usar el método MIG para soldadura por puntos que se puede llevar a cabo con algunos de los equipos MIG corrientes, completados con un relé de tiempo y una boquilla de gas. La soldadura se verifica presionando la pistola contra la chapa superior. El tiempo de soldadura se ajusta mediante un relé de tiempo, con lo cual se consigue una buena reproducibilidad. La penetración se puede controlar para conseguir que la parte fundida penetre entre las dos chapas. El método preferido depende del espesor de la chapa inferior. Las ventajas desde el punto de vista de construcción se basan en que se pueden aceptar grandes diferencias de espesor entre la chapa superior y la inferior. Cuando se trata de espesores grandes, en la chapa superior se puede facilitar la soldadura haciendo un taladro.

SOLDADURA DE PULSO CORTO CON MIG

Sobreponiendo una corriente con la frecuencia de 16 - 100 Hz. sobre la corriente normal, es posible obtener una pulsación de corta duración, con unas propiedades tales que se puede soldar material con espesores inferiores a 3 mm. En cada máximo pulso, se desprende una gota de material de aportación. Las ventajas de este método son las siguientes:

- Se puede soldar metal más delgado, 1,5 mm.
- Diferentes espesores se pueden soldar con más facilidad.
- Un arco estable hace disminuir el riesgo de defectos de soldadura.
- Es más fácil soldar con aberturas variables.
- Se pueden utilizar materiales de aportación más gruesos.

SOLDADURA MIG DE MATERIAL GRUESO

El uso reciente de aluminio grueso, particularmente de la aleación AlMg4,5Mn (EN AW 5083), ha conducido al desarrollo de una técnica, especialmente adaptada a estos fines, basada en el método MIG. En este sentido se puede mencionar el método NARROW GAP de Sciaky, que con soportes colocados oblicuamente uno detrás de otro, permite la soldadura a tope sin preparación de bordes y con una abertura de 6-9 mm. para materiales gruesos.

En Japón se ha desarrollado el método NHA (NARROW GAP HORIZONTAL welding process for aluminium) para aberturas horizontales. Un soplete de doble envoltura con movimiento oscilante es guiado automáticamente a lo largo de la unión. Las ventajas de estas dos variantes del método MIG consisten en la mejor utilización del calor y el menor volumen de la junta, lo cual lleva consigo un incremento de la productividad.

Tabla de amperios aconsejada para la soldadura MIG

Diámetro del hilo	Corriente (A)
0,8 mm	80 ÷ 140
1,2 mm	120 ÷ 210
1,6 mm	160 ÷ 300
2,4 mm	240 ÷ 450

SOLDADURA TIG

En la soldadura de aluminio con arco de tungsteno y gas de protección inerte (TIG) se usa una fuente de corriente alterna de 50 Hz., una corriente de alta frecuencia superpuesta (CA). El electrodo es no fusible de tungsteno puro o tungsteno aleado con circonio. Este método de soldadura se puede usar en todas las posiciones y utilizado correctamente permite la obtención de una soldadura de gran calidad. El peligro de porosidad es menor que en la soldadura MIG. El arco rompe la película de óxido y por lo tanto, para la automática se usa hilo en bobinas. Como regla, se usa la soldadura TIG para espesores de 0,7 a 10 mm. pero no hay realmente un límite máximo. La velocidad de soldadura es más baja que en la SOLIM. Se deben preparar los bordes cuidadosamente para que no haya aberturas entre las placas, ya que es mucho más fácil de controlar el baño de fusión si la separación es mínima. En espesores superiores a 5 mm. se deben biselar las aristas de las uniones a soldar. Cuando se trata de soldadura de chapa fina resulta más ventajoso el uso de plantilla para evitar las distorsiones debidas al calor de la soldadura y las separaciones entre bordes debidas a aquellas.

SOLDADURA DE PULSO LARGO

Muchas fuentes de energía para TIG tienen capacidad para soldadura de pulso. Para otras se puede fácilmente conectar una unidad adicional. El principio es similar al descrito en la soldadura MIG - pulso, con la sola diferencia de que la soldadura TIG se lleva a cabo con una frecuencia mucho más baja, aproximadamente 10 Hz. Esto implica que los pulsos son bien visibles lo cual, a la larga, puede ser una

fuelle de imitación para el soldador. La técnica se puede aplicar tanto a la soldadura con CA como con CC. Se trabaja con dos niveles de corriente. El más bajo se elige para que no se apague el arco. El nivel más alto es generalmente más elevado que en la soldadura normal TIG. Los periodos de los diferentes niveles pueden variar. La ventaja consiste en que se puede conseguir una soldadura perfecta con una intensidad de corriente media más baja que en la soldadura normal. La aportación de calor es más baja y se puede soldar material más delgado: 0,3 a 0,4 mm. Con las combinaciones de CC y pulso se pueden soldar espesores del orden de 0,05 mm.

SOLDADURA POR FRICCIÓN (Fiction Stir Welding - FSW)

La soldadura por fricción es un proceso de penetración completa en fase sólida, que se utiliza para unir chapas de metal -actualmente y principalmente de aluminio- sin alcanzar su punto de fusión.

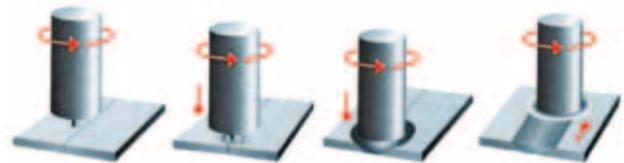
El procedimiento está basado en el principio de obtener temperaturas suficientemente altas para forjar dos componentes de aluminio, utilizando una herramienta cilíndrica rotatoria no consumible que posee una sonda en la parte inferior (pin) que se desplaza a lo largo de una unión a tope. Las piezas han de ser fijadas a un soporte de apoyo de manera que se prevenga que el calor producido separe las partes a soldar. El calor generado por la fricción entre la herramienta (pin) y las piezas a unir, provoca el ablandamiento del material base sin llegar a alcanzar el punto de fusión y permite el desplazamiento de la herramienta a lo largo de la línea de soldadura. El material en estado plástico se transfiere a la parte posterior de la herramienta y se forja por el contacto íntimo de la

zapata de la herramienta y el perfil del tetón de la misma. Al enfriarse deja una unión en fase sólida entre las dos piezas. Últimamente se ha desarrollado nuevos procesos que aparte de la soldadura longitudinal, se ha conseguido sustituir esta por pequeños segmentos o puntos localizados a lo largo de una trayectoria. Tras ligeras modificaciones se ha desarrollado un sistema de soldadura FSSW para sustituir la soldadura de resistencia por puntos y a las uniones atornilladas o remachadas porque son uniones de mayor calidad y reducción de costos y tiempos. Este sistema es interesante para unir materiales disimilares.

La soldadura por fricción, puede ser utilizada para unir chapas de aluminio sin material de aportación o gas de protección. El espesor del material varía desde 1'6 mm. hasta 30 mm., pudiendo ser soldados con penetración total y sin porosidad ni cavidades internas.

Se consiguen soldaduras de alta calidad e integridad con una muy baja distorsión, en muchos tipos de aleaciones de aluminio, incluso aquellas consideradas de difícil soldadura por métodos de fusión convencionales.

Entre los materiales que han sido soldados con éxito mediante soldadura por fricción se incluyen una amplia variedad de aleaciones de aluminio (series 2xxx-AlCu Cobrealtok), 5xxx-AlMg (Magnealtok), 6xxx-AlMgSi (Simalgaltok), 7xxx-AlZn (Alzintok), 8xxx y aleaciones Al-Li. Últimamente se han conseguido mediante éste método uniones en plomo, cobre, magnesio e incluso aleaciones de titanio.



	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	resto
1050 A	Al 99,5	0,40	0,05	0,05	0,05			0,07	0,05	0,03	99,50
1100	Al 99,0	0,95 Si+Fe	0,05-0,2	0,05				0,10		0,15	99,00
1200	Al 99,0	1,00 Si+Fe	0,05	0,05				0,10	0,05	0,15	99,00
4043	4,5-6,0	0,80	0,30	0,05	0,05			0,10	0,20	0,15	
5356	0,25	0,40	0,10	0,05-0,2	4,5-5,5	0,05-0,2		0,10	0,06-0,20	0,15	
5554	0,25	0,40	0,10	0,5-1,0	2,4-3,0	0,05-0,2		0,25	0,05-0,2	0,15	
5556	0,25	0,40	0,10	0,5-1,0	4,7-5,5	0,05-0,2		0,25	0,05-0,20	0,15	
5654	0,45 Si+Fe		0,05	0,01	3,1-3,9	0,15-0,35		0,20	0,05-0,15	0,15	

Equivalencias internacionales

	España	GB	USA	Alemania	Francia	Suecia	Noruega
1050 A	L-3051	1B		Al 99	A-5		17010
1100					A-45		
1200	L-3001	1C			A-4		
4043	L-3511	N21	ER4043			SvAk5	
5356					A-G5MC	AlMg5	
5554		N52					
5556		N61					
5654							

Las aleaciones 1050-1100 y 1200, son equivalentes



INFORMACIÓN

Aleación base	Facilidad a la soldadura						Resistencia en la junta soldada						Resistencia a la corrosión						Resistencia de trabajo a temperatura superior a la normal						Homogeneidad del color después de la anodización						Ductibilidad											
	1200	4043	5654	5356	5554	5556	1200	4043	5654	5356	5554	5556	1200	4043	5654	5356	5554	5556	1200	4043	5654	5356	5554	5556	1200	4043	5654	5356	5554	5556	1200	4043	5654	5356	5554	5556						
Aleación a soldar																																										
5052, 5754	-	MB	B	MB	R	MB	-	E	R	B	R	MB	-	R	B	B	MB	B	-	MB	-	-	-	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5154, 5754	-	MB	B	MB	R	MB	-	E	R	B	R	MB	-	R	B	B	MB	B	-	MB	-	-	-	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5454	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5083, 5086, 5456	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6060, 6063, 6101	-	MB	R	B	R	B	-	B	MB	MB	MB	MB	-	MB	B	-	B	B	-	MB	-	-	-	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6061, 6082	-	MB	R	B	R	B	-	E	R	B	R	MB	-	MB	B	-	B	B	-	MB	-	-	-	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5083, 5056																																										
5154, 5754	-	-	B	MB	B	MB	-	-	R	B	R	MB	-	-	MB	MB	MB	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5454	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5083, 5086, 5456	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6060, 6063, 6101	-	MB	B	MB	B	MB	-	B	MB	MB	MB	MB	-	MB	MB	MB	MB	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6061, 6082	-	MB	B	MB	B	MB	-	E	R	B	R	MB	-	MB	B	-	B	B	-	MB	-	-	-	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5086																																										
5154	-	-	B	MB	B	MB	-	-	R	B	R	MB	-	-	MB	MB	MB	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5454	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5086	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6060, 6063, 6101	-	MB	B	MB	B	MB	-	B	MB	MB	MB	MB	-	MB	MB	MB	MB	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6061, 6082	-	MB	B	MB	B	MB	-	E	R	B	R	MB	-	MB	B	-	B	B	-	MB	-	-	-	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6060, 6082																																										
6060, 6061, 6082	-	MB	R	B	R	B	-	B	MB	MB	MB	MB	-	MB	B	R	B	R	-	MB	-	-	-	MB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

MB: Muy Bueno B: Bueno R: Regular E: Malo, evitar.

NOTAS: (1) La clasificación de la resistencia a la corrosión se basa en las pruebas de inmersión alternada o continua en agua dulce o salada.
 (2) La clasificación para las aleaciones del grupo 6000 (AlMgSi) pierde su validez cuando va seguido de tratamiento térmico.

El comportamiento de los materiales al contacto con los productos químicos, minerales y orgánicos, debe ser conocido antes de considerar su almacenamiento o transporte en un vehículo industrial: cisterna, volquete, etc. Es por lo tanto necesario conocer la compatibilidad de un metal o una aleación con el producto a transportar o almacenar. A pesar de las reglas que nosotros recordamos éstas no son siempre previsible sobre todo cuando se trata de productos orgánicos. Las tablas de compatibilidad de los principales metales y aleaciones usuales han sido establecidas sobre la base de ensayos de laboratorio, algunos de los cuales son muy antiguos. También se basan en la experiencia adquirida en la práctica.

COMPATIBILIDAD

La compatibilidad de un metal con un producto es su capacidad a resistir a los efectos químicos de éste, en particular consiste en una disolución más o menos rápida que depende de un cierto número de parámetros relativos como:

- **Metal o la aleación.** Cada uno tiene su sensibilidad propia en un medio dado. Ningún metal o aleación resiste a todos los ambientes, ácidos, bases, sales, productos orgánicos, etc. No hay una tabla de compatibilidad universal, válida para todos los metales y aleaciones. Por ejemplo, es imposible deducir el comportamiento de un acero, del aluminio, o recíprocamente, al contacto de un producto dado.
- **Producto por sí mismo.** Su naturaleza, la familia química a la que pertenece, la concentración, las impurezas, los aditivos si los hay, etc., así hay que esperar que las especies químicas muy disociables, es decir, capaces de dar las soluciones ácidas o alcalinas, sean más reactivas que los productos orgánicos inertes tales como las amidas, por ejemplo.
- **Las condiciones de transporte o de almacenamiento.** En las cuales la temperatura, la duración, la presencia eventual de humedad que pueden modificar de una manera importante, el comportamiento del metal.

COMPATIBILIDAD DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

No más que para otros metales o aleaciones, no es posible prever el comportamiento del aluminio o de sus aleaciones al contacto con un producto químico para el cual no se dispone de datos fundados en la experiencia o en pruebas de laboratorio, se puede sin embargo basar en algunas reglas que son más específicas a las aleaciones de aluminio.

Las soluciones ácidas y bases minerales tienen una acción generalmente conocida y cuantificada. La mayoría de las veces, provocan una disolución regular del metal. Es la corrosión uniforme.

Las soluciones acuosas de ciertas sales, ácidos o bases minerales son susceptibles de provocar una corrosión por picaduras del aluminio y sus aleaciones.

Los ácidos orgánicos son mucho menos agresivos en contacto con el aluminio y sus aleaciones que las soluciones ácidas minerales (a excepción del ácido nítrico). De una manera general, la agresividad decrece cuando la masa molecular y el número de átomos de carbono aumentan. En otros términos, la acción del ácido fórmico en «C1» es más marcada que la de un ácido en «C4» o más.

La acción de los productos pulverulentos dependen, por lo esencial, de la presencia de humedad.

El papel de los aditivos o de impurezas, que pueden ser variables en naturaleza y concentración, de un fabricante a otro, de una aplicación a otra, depende de la naturaleza de éstos y de su concentración.

La mayor parte de los derivados minerales u orgánicos, de ciertos metales, y más particularmente de estos: Cobre, Mercurio, Plomo, Estaño, no pueden ser transportados o almacenados en vehículos construidos con aleaciones de aluminio. La experiencia demuestra que estos metales, pueden provocar corrosiones, más o menos severas del aluminio y de sus aleaciones en sus formas de barras, tubos y chapas. El aluminio no modifica la estabilidad de productos químicos, tales como el agua oxigenada, los derivados halógenos, los hidrocarburos, etc. En otros términos, no se produce acción catalítica sobre las posibles reacciones de descomposición, que pueden intervenir sobre los efectos por el aumento de temperatura. Es bien conocido que ciertos derivados halógenos tienen tendencia a descomponerse cuando son sometidos a una temperatura cercana a su punto de ebullición. Esta ebullición libera ácido clorhídrico cuando se trata de derivados del cloro, bromhídrico si se trata de derivados de bromo, etc.

Esta es la razón por la que se desaconseja transportar o almacenar, incluso a temperatura ambiente, los derivados halógenos siguientes (esta lista no es exhaustiva): Cloruro de metilo, CH_3Cl , Bromuro de metilo, CH_3Br , Ioduro de metilo, etc.

LA ACCIÓN DE LA HUMEDAD

Por principio, en ausencia de humedad, un producto pulverulento no tiene acción sobre el aluminio y sus aleaciones puesto que la corrosión, de naturaleza electro-química, no puede desarrollarse más que en un ambiente acuoso.

Según su solubilidad, la humedad puede disolver uno o varios de los constituyentes de un producto químico. Según la naturaleza de los productos, esta solución puede ser, más o menos, o en absoluto, agresiva y producir una corrosión localizada por picaduras o una corrosión uniforme.

De una manera general, son las sales de ácidos o de bases fuertes las que, si son muy solubles, pueden modificar sensiblemente el comportamiento de una aleación de aluminio si éste entra en contacto con las sales.

Hay que distinguir entre:

- a/ El agua bloqueada que entra en la constitución de la molécula, es el caso por ejemplo, del sulfato de magnesio, $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$. Se llama también **Agua de cristali-**

zación, o Agua de constitución. Este agua está unida a la molécula y no modifica pues el comportamiento de las aleaciones de aluminio, al contacto de este producto, mientras que no hay deshidratación bajo el efecto de un aumento de temperatura.

b/ La humedad, de la que una parte es agua unida a la superficie del producto, puede tener varios orígenes: secado incompleto, adición de agua, condensación del aire, etc. contrariamente a la precedente, este agua puede disolver los constituyentes de los productos químicos húmedos. Si son agresivos frente al aluminio y sus aleaciones, puede haber corrosión de éstos.

LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

La elevación de la temperatura, puede tener dos consecuencias:

a/ **Activar la velocidad de reacción.** Esta es una regla general que se deduce de la relación de Arrhenius.

Se considera que un aumento de temperatura de 10° C dobla la velocidad de reacción.

b/ **Provocar la descomposición de una molécula.**

En varios constituyentes en los que algunos pueden ser agresivos. Los derivados clorados derivados de los hidrocarburos son un buen ejemplo: el tetracloruro de carbono, el cloruro de metilo, el cloruro de benzilo, etc. se descomponen cuando la temperatura aumenta. Su descomposición libera ácido clorhídrico provocando la corrosión de las aleaciones de aluminio.

EL ALUMINIO EN LA ALIMENTACIÓN

Casi todas las aleaciones de los grupos EN AW 1000 (Aluminio puro), EN AW 5000 (AlMg), EN AW 6000 (AlMgSi) (sin Pb) y algunas de otras familias cuya composición está conforme a las normas AFNOR NF A-50-411 y NF A-50-451 se pueden utilizar en la alimentación. Estas disposiciones serán tomadas como referencia en las Normas EN 601 para los productos de fundición y EN 602 para los semi-productos extruidos y laminados.

Por lo tanto se puede transportar y almacenar productos agroalimentarios destinados a la alimentación humana sin estar obligados a revestir el interior de los recipientes de aleaciones de aluminio citadas en estas normas.

COMPATIBILIDADES

A continuación detallamos una relación de diferentes productos y su comportamiento frente al aluminio. El resultado de éste estará condicionado a las condiciones de uso, al medio ambiente que lo rodean, a la composición del metal y otros factores.

Si desea ampliar información no dude en consultar a nuestro departamento técnico.

SUSTANCIAS INORGÁNICAS

Acetatos alcalinos		Carbonato de amonio	
Acido arsénico		Carbonato de potasio	
Acido bórico		Carbonato sódico	
Acido carbónico		Carburo de calcio (Anhídrido)	
Acido crómico		Cemento	
Acido hidrobromídrico		Cemento (humedo)	
Acido hidroclohídrico		Cemento aluminoso	
Acido hidrofleurhídrico		Clorato potásico	
Acido nítrico (C>80% a 20°C)		Clorato sódico	
Acido nítrico (diluido)		Cloruro (Anhídrido)	
Acido nitroso		Cloruro de aluminio	
Acido ortofosfórico		Cloruro de amonio	
Acido perclorhídrico		Cloruro de bario	
Acido sulfúrico		Cloruro de calcio	
Acido sulfúrico (en solución diluida)		Cloruro de estaño	
Acido sulfuroso (en solución diluida)		Cloruro de magnesio	
Agua clorada		Cloruro de mercurio	
Agua de lluvia		Cloruro de Zinc	
Agua de mar		Cloruro férrico	
Agua destilada		Cloruro potásico	
Amonio (gas)		Cloruro sódico	
Azufre		Cromato potásico	
Bicarbonato sódico		Dicromato potásico	
Bisulfito sódico		Dióxido de azufre	
Borato sódico (solución fría)		Disulfuro de carbono	
Bromuro de amonio		Ferrocianuro potásico	
Bromuro de potasio		Fluorsilicato sódico (<1%)	
Bromuro sódico		Formato de amonio	
Carbonato cálcico		Fosfato de amonio (dibásico)	
Carbonato cálcico (cal)		Fosfato sódico tribásico	

Muy bueno

Bueno

Regular

Malo/evitar

COMPATIBILIDADES

SUSTANCIAS INORGÁNICAS

Fosfuros (anhídridos)		Peróxido de hidrogeno (diluido)	
Herbicidas inorgánicos		Peróxido de nitrogeno (humedo)	
Herrumbre		Peróxido de nitrogeno (seco)	
Hexasulfuro de fósforo		Peróxido de sodio	
Hidrogeno sulfídrico (anhídrido)		Persulfato de amonio	
Hidrogeno sulfuroso		Sales de mercurio	
Hidrosulfuro cálcico		Silicato de magnesio	
Hidróxido de bario (En solución)		Silicato de potasio	
Hidróxido potásico		Silicato de sodio	
Hidróxido sódico		Solución amoniaca	
Hipoclorito cálcico		Solución de amoniaco	
Hipoclorito potásico		Sulfato cálcico	
Hipoclorito sódico		Sulfato de aluminio	
Hiposulfito sódico		Sulfato de amonio	
Ioduro (cristales de anhídrido)		Sulfato de cobre	
Ioduro (en tintura alcohólica)		Sulfato de magnesio	
Ioduro de arsenio		Sulfato de potasio	
Lejía		Sulfato de sodio	
Mercurio		Sulfato de Zinc (<10 %)	
Monóxido de carbono		Sulfato férrico	
Nitrato de aluminio		Sulfato ferroso	
Nitrato de amonio		Sulfato potásico de aluminio	
Nitrato de potasio		Sulfito de sodio	
Nitrato sódico		Sulfuro cálcico (Puro)	
Nitrito de potasio		Sulfuro de amonio	
Nitrito sódico		Sulfuro de cal	
Oxalato cálcico		Sulfuro de sodio	
Oxalatos alcalinos		Tinta china	
Oxido crómico		Tiocianato potásico	
Oxido de litio		Vapores de nitrógeno (seco)	
Oxido de Zinc (<10 %)		Yeso	
Pentóxido de fósforo			
Perclorato de amonio			
Permanganato potásico			
Peróxido de hidrógeno (concentrado)			

Muy bueno

Bueno

Regular

Malo/evitar

COMPATIBILIDADES

SUSTANCIAS ORGÁNICAS

Aceites esenciales	████████	Alcanfor	████████
Aceites de girasol	████████	Alcohol etílico, al 98% (frío)	████████
Aceites de oliva	████████	Alcohol metílico (98%, frío)	████████
Aceites vegetales	████████	Aldehído benzoico	████████
Acetaldehído (mojado)	████████	Aminas aromáticas	████████
Acetanilina	████████	Anhídrido acético	████████
Acetato de butilo	████████	Anilina (líquida), fría	██████
Acetato de celulosa	████████	Antraceno	████████
Acetileno	████████	Antraquinona	████████
Acetona	████████	Arcilla	██████
Acido acético (diluido)	████████	Asfalto	████████
Acido antranílico	████████	Benceno	████████
Acido benzoico	████████	Benzaldehído	████████
Acido butírico	████████	Betún	████████
Acido cítrico (frío)	████████	Bromoformo	██████
Acido esteárico	████████	Bromuro de metilo	██████
Acido fórmico	███	Carbón (mojado)	███
Acido ftálico (puro)	████████	Carbón (seco)	████████
Acido gálico	████████	Celulosa (seca)	████████
Acido glicólico	██████	Ceras	████████
Acido hidrocianídrico	████████	Cetonas aromáticas	████████
Acido láctico (caliente)	███	Cianuro de potasio	██████
Acido málico (<10 %, frío)	██████	Cloroformo (hirviendo), puro	████████
Acido margárico	████████	Cloroformo (mojado), a 20°C	████████
Acido oleico	████████	Cloruro de benceno (seco)	██████
Acido oxálico	██████	Cloruro de etanol (Anhídrido), frío	████████
Acido palmítico	████████	Cloruro de metilo	███
Acido pícrico, puro	████████	Colas (neutras)	██████
Acido salicílico	████████	Corcho (húmedo)	██████
Acido succínico	████████	Corcho (seco)	████████
Acido tánico	████████	Cresol (a menos de 80°C)	██████
Acido tartárico (10%, frío)	██████	Crotonaldehído	████████
Acido valérico	████████	Dibromuro de etileno	██████
Acidos grasos	████████	Dicloetano (Anhídrido)	████████
Agua de colonia	██████	Dicloetileno (Anhídrido)	████████

Muy bueno ██████████
 Bueno ████████
 Regular ██████
 Malo/evitar ████

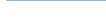
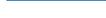
COMPATIBILIDADES

SUSTANCIAS ORGÁNICAS

Dicloruro de etileno (Anhídrido)	████████	Naftaleno	████████
Disulfuro de carbón	████████	Naftilamina	███
Esmaltes	████████	Nicotina	████████
Extracto de nuez	████████	Nitroglicerina	████████
Eter etílico (no medicinal)	████████	Nitrocelulosa	████████
Eteres	████████	Orina	███
Etilen glicol	████████	Oxalato etílico	████████
Extracto de madera de Panamá	██	Parafina	████████
Fenilamina (frío)	████████	Paraldehido	███
Fenol (concentrado)	████████	Percloretileno (anhídrido)	████████
Fenoles (<100°C)	████████	Pirrol	████████
Formaldehido	███	Queroseno	████████
Formato de aluminio	███	Reactivos fotográficos	██
Fuel oil	████████	Resinas	████████
Fulminato de mercurio	██	Resorcinol	████████
Furfural	████████	Salizaldeido	████████
Gas ciudad	████████	Sulfato de anilina	██
Gelatina (seca)	████████	Sulfato de nicotina	████████
Glicerina (pura)	████████	Sulfonal	████████
Goma	████████	Tabaco	████████
Grasa animal	████████	Tanina	████████
Herbicidas	███	Tanina sintética	██
Hexameten tetramina	████████	Tetracloruro de carbono	████████
Hidrocioruro de anilina	██	Tetramina	████████
Hidroquinona	████████	Tintes	███
Indol	████████	Tiourea	████████
Iodoformo	████████	Tolueno	████████
Jabón suave	███	Tricresilfosfato	████████
Latex	████████	Trietanolamina	████████
Manitol	████████	Urea	████████
Metaldehido	████████		
Metanol (<75%)	███		
Metilamina	████████		
n-butanol	████████		
n-e-isopropanol	████████		

Muy bueno ██████████
 Bueno ██████
 Regular ████
 Malo/evitar ██

PRODUCTOS ALIMENTARIOS

Aceite doméstico		Mostaza	
Aceitunas		Nata	
Anchoas en escabeche		Pan	
Azúcares		Pepinillos	
Brandy		Pescados	
Cacao		Queso	
Café		Ron	
Caramelo		Sacarosa	
Carnes		Sal marina	
Cerveza		Sidra	
Cereales		Soda	
Clara de huevo		Suero	
Cognac		Te	
Cuajada		Vainas	
Chocolate		Vinagre	
Esencia de fruta		Vino	
Espinacas		Whisky	
Flan de huevo		Yogur	
Galletas		Zumo de cebolla	
Ginebra		Zumo de limón	
Glucosa		Zumo de manzana	
Harina		Zumo de naranja	
Helado		Zumo de tomate	
Hielo		Zumo de zanahoria	
Lactosa			
Leche			
Levadura			
Licores			
Limonada			
Mantequilla			
Mantequilla (salada)			
Margarina			
Mentol			
Mermelada			
Miel			

10

Muy bueno 
 Bueno 
 Regular 
 Malo/evitar 