

LA SOLDADURA DE

ALUMINIO



JUAN MANUEL PIÑA ASTETE

JUAN CARLOS GARCÍA TRUJILLO

INDICE

LA SOLDADURA EN
ALUMINIO.....PAG: 2

PROTECCIÓN SUPERFICIAL DEL
ALUMINIO.....PAG: 11

ESTADO BASICO DEL
ALUMINIO.....PAG: 18

TRATAMIENTO DEL
ALUMINIO.....PAG: 25



LA SOLDADURA EN ALUMINIO

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 (Tungtène 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 comunmente 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 altocontenido en magnesio AlMg5 (EN AW 5356-5556) dan mayor resistencia, mientras que la de AlSi5 (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 AlSi5 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 AlSi5 (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:

1º Eliminación de la suciedad y desengrasado

en frío con alcohol o acetona.

2º Lavar con agua y secar inmediatamente para

evitar el riesgo de oxidación.

3º 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. HNO₃ + HCl + HF.
 - Lavado con agua y secado inmediato.
 - Neutralización con HNO₃ (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 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 AISi5 (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 mts./min. y para la soldadura robotizada de 2 a 3 mts./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 fuente 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.

PROTECCIÓN SUPERFICIAL DEL ALUMINIO



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 o 0,4 micras sobre metal que haya permanecido en un horno de recocido.

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 o 0,4 micras sobre metal que haya permanecido en un horno de recocido.

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 o 0,4 micras sobre metal que haya permanecido en un horno de recocido.

■ 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 purezas y aleaciones) tiene una importancia capital sobre los resultados que se consiguen y los medios a utilizar para obtenerlos.

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 .

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 los más comerciales y estos son:

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

2° **Desengrase:**

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

3° **Lavado con agua en circulación y con continua regeneración.**

4° **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.

5° **Lavado con agua en circulación y con continua regeneración**

6° **Neutralizado** (ácido nítrico 60% en agua a temperatura ambiente)

7° **Lavado con agua en circulación y con continua regeneración.**

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

9° **Lavado con agua en circulación y con continua regeneración**

10° **Coloración.**

Por su estructura porosa, la capa de óxido formada en medio sulfúrico se asemeja a las fibras textiles y puede, al igual que estas, 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 estos 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 alúmina 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, correr 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 practica 97 a 100oC) 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, acético y bórico.

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 (0oC) 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:

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.

Procedimiento «ANESDUR».

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. El sistema «ANESDUR» permite obtener capas superiores a 150 micras con aleaciones de aluminio que contengan:

Hasta un 6% de Mg (Magnesio)

Hasta un 5% de Cu (Cobre)

Hasta un 8% de Zn (Cinc)

Hasta un 13% de Si (Silicio)

EL ALUMINIO: ESTADOS BÁSICOS

■ DENOMINACIÓN DE LOS ESTADOS BÁSICOS DEL PROCESO

P. 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).

Aplicado a semi-productos cuya resistencia ha aumentado mediante deformación en frío, con o sin tratamiento térmico complementario 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 para producir estados distintos F, O y H

A semi-productos en los que se aumenta su resistencia mecánica mediante tratamiento térmico con o sin acritud suplementaria, para obtener estados estables. La letra "T" va siempre seguida de uno o más dígitos.

■ 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:

H: Acritud solamente

Aplicado a los semi-productos los cuales son endurecidos por deformación plástica en frío solamente hasta obtener la resistencia mecánica deseada, sin tratamiento térmico complementario.

H2: Acritud y recocido parcial

Aplicado a los semi-productos que son endurecidos por deformación plástica en frío hasta obtener una resistencia mecánica superior a la deseada, la cual se obtiene posteriormente mediante un tratamiento térmico de recocido parcial. En este estado, para un mismo nivel de resistencia mecánica que el H, presenta un mayor alargamiento.

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 indicará el grado final de acritud recibido:

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 para calificarlo como H(x). (El alargamiento es de un 3% aproximadamente.)

2. SUBDIVISIÓN DE LOS ESTADOS T: TRATAMIENTO TÉRMICO

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 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

Una segunda cifra añadida (no debe ser 0), indica variaciones en el tratamiento que alteran de forma significativa las propiedades de los semi-productos. Hay tratamientos desarrollados y registrados en A.A. y E.A.A. entre ellos y 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 6063. (SIMAGALTOK 63).

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.

TRATAMIENTOS DEL ALUMINIO

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

- a) Aleaciones no templables, con endurecimiento por acritud.
- b) 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 Manganeseo) 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 (Magnealtok 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 (Magnealtok 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 :

1° 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 actitud crítica, si no se cumple esta condición, hay que limitarse a un tratamiento de recocido sin permitir la recristalización.

2° Adoptar una velocidad rápida de aumento de la temperatura: de 20° a 60°C por hora.

3° Limitar el nivel de temperatura al intervalo de 350° a 380°C.

4° 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), 6.000 (Aluminio-Magnesio-Silicio) y 7000 (Aluminio-Zinc). 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 Mg_2Si para las aleaciones de la serie 6000, de tipo Al_2Cu para los de la familia 2000, se redisuelven y la aleación forma entonces una solución sólida homogénea.

■ 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 (SIMAGALTOK)

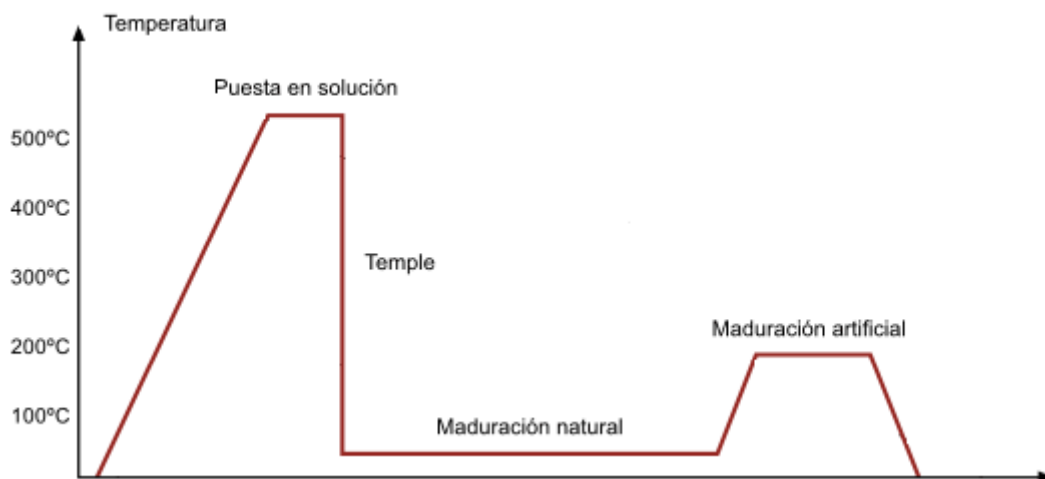
Las aleaciones de la familia 6000, tales como la 6005 A, 6060, 6061, 6063, 6082, 6101, 6351, pueden ser templadas inmediatamente a la salida de la prensa por enfriamiento al aire soplado o por una ducha de agua. A la salida de la prensa (alrededor de 530°C aprox.) los perfiles están a una temperatura 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.