



**CIDPROC**  
Centro de Innovación,  
Desarrollo y Producción Circular

# Fundición de materiales reciclables de Aluminio II. Producción de aleaciones

J. Pérez, V. H. Bravo, W. Avelino

**CIDPROC**

D. Mata, E. Arreola, D. Jaramillo, R. Ambriz.

**FUNDIDORA DEMAZA, CMP+L, CIITEC.**

**Versión del 24 de Septiembre 2024**

# Fundición de materiales reciclables de Aluminio II. Producción de aleaciones

## Introducción

El aluminio es uno de los metales que tiene una amplia gama de usos en la industria y en las actividades diarias de las personas. Dentro de los principales productos semiterminados de aluminio se encuentran, materiales extruidos, cintas, alambre, cables, polvo, pastas materiales forjados, productos multiforma. Más de la mitad de la producción mundial de aluminio es usado para la fabricación de materiales extruidos y cintas, arriba del diez por ciento de aluminio es usado para producir alambre, cable, polvo y forjas.

El aluminio tiene múltiples usos y aplicaciones en la industria, por ejemplo, del transporte ,en la producción de automóviles, aeronaves, vagones de tren, lanchas, barcos, además de la industria de la construcción donde se usa en la elaboración de puertas, ventanas, estructuras, muebles. Los alambres y cables son usados en aparatos eléctricos, envases de latas (refresco, conservas, cerveza , aceites) utensilios domésticos, productos de belleza, papel, en la producción de refrigeradores, lavadoras entre otros. Actualmente la mayor parte del aluminio que se consume es aluminio primario aunque se espera un aumento en el consumo mundial del aluminio reciclado del 28 al 30 % en los próximos años.

## Fundición de aleaciones

Los usos del aluminio son tan versátiles que se encuentran en diferentes áreas de la vida del ser humano, podemos encontrarlo íntimamente ligado a nuestra vida diaria, hasta en las intrépidas hazañas espaciales abarcando una amplia gama de usos intermedios.

Aunque existen normas estandarizadas de la composición química de las aleaciones del aluminio los usuarios definen finalmente la composición específica de la aleación que quieren usar ya que en base a su experiencia definen la composición, que les garantiza la calidad requerida de sus productos.

A continuación, se presenta la composición química de algunas aleaciones de aluminio comúnmente usadas.

**Tabla 1.** Composición química de aleaciones de Aluminio.

Elemento	Aluminio 319	Aluminio 356	Aluminio 380	Aluminio 413	Aluminio 390
Si	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-9.5	11-13	16-18
Fe	1.0-1.2	0.2/0.6	1.3/2.0	0.5/2.0	0.5/1.3
Cu	3.0-4.0	0.2/0.25	3.0-4.0	1	4.0-5.0
Mn	0.5/0.8	0.1/0.35	0.5	0.35	0.1/0.5
Mg	0.1/0.5	0.2-0.45	0.1	0.1	0.45-0.65
Cr	-	-	-	-	-
Ni	0.35/0.5	-	0.5	0.5	0.1
Zn	1.0/3.0	0.1/0.35	3.0	0.5	0.1/1.5
Ti	0.25	0.0/0.25	-	-	0.2
Sn	-	-	0.35	0.15	-

**Fuente:** elaboración propia.

Como se mencionó en la primera parte de este documento, las aleaciones de aluminio de uso común son las que contienen silicio en diferentes cantidades, el cual se adiciona en forma de silicio metálico. Comercialmente existen diferentes tipos de este elemento cómo: El silicio 553 tiene menos de 0.5 % de hierro (Fe) y aluminio (Al) y menos de 0.3 de Calcio (Ca). El silicio 3303 es un silicio que tiene menos de 0.3 % de hierro (Fe) y aluminio (Al) además de menos de 0.03 de Calcio (Ca) y menos de 0.005 de fósforo (P). Otro elemento importante en las aleaciones de aluminio es el Cobre (Cu) que comúnmente se puede encontrar como chatarra de cobre de primera o de segunda ya que algunas ocasiones puede ser cable chamuscado o con gran cantidad de barniz.

En el procesamiento de chatarra de aluminio se debe tener un buen control del hierro presente ya que es un elemento que perjudica las propiedades mecánicas de las aleaciones. Se debe limpiar el material de hierro antes de adicionarlo al horno y en el caso de que este en el baño de aluminio se debe trabajar a baja temperatura para evitar que se disuelva y/o escorificarlo además de separarlo físicamente del baño.

## Influencia de los elementos de aleación

- **Silicio.** El efecto más importante del silicio consiste en mejorar el proceso de moldeo ya que adicionarlo al aluminio se mejora la fluidez, la resistencia a la segmentación del fluido en caliente, y la facilidad de llenado del molde, además de la reducción de gravedad específica y del coeficiente de expansión térmica. Las aleaciones de aluminio más comerciales son las que contienen silicio hasta cerca del 25 %, esto es el rango hipoeutéctico y hipereutéctico. La cantidad de silicio usada para moldeo en arena, pasta, investment, está en el rango de 5 a 7% de Si, para moldeo permanente del rango de silicio puede ser de 7 a 9% y para die casting de 8 a 12%.
- **Cobre.** El Cobre aumenta considerablemente la dureza, la resistencia a la tensión debido a la fase teta que forma con el Aluminio. También mejora las condiciones de tratamiento térmico, reduce la resistencia a la corrosión, puede reducir la moldeabilidad y la segmentación del fluido caliente. En la serie de las aleacio-

nes Al, Si, Cu, el cobre forma una fase intermedia dura y frágil que por su estructura compleja tiene gran resistencia al deslizamiento. Esta es la fase teta  $CuAl_3$ .

- **Hierro.** El aumento de la concentración de hierro disminuye la ductilidad ya que forma fases insolubles durante la fusión de aleaciones de aluminio,  $FeAl_3$ ,  $FeMnAl_6$ ,  $\alpha$   $AlFeSi$ . Estas fases aumentan con el aumento de la concentración de hierro y afecta la fluidez durante la alimentación en el moldeo, además de promover la formación de espumas con manganeso, cromo y otros elementos.
- **Zinc.** En presencia de cobre y manganeso mejora el tratamiento térmico y el envejecimiento natural.
- **Manganeso.** El manganeso es un importante elemento de aleación para los materiales que se van a forjar. A elevadas fracción volumétrica de  $MnAl_6$  en aleaciones que contienen más de 0.5 % Mn puede mejorar las condiciones de moldeo además de que puede influir en el acabado químico y el anodizado.

- **Magnesio.** En las aleaciones Al-Si ayuda a mejorar la dureza y la tensión en el tratamiento térmico. La fase del endurecimiento  $Mg_2Si$  tiene una solubilidad máxima de 0.70% de Mn a valores mayores no ocurre un endurecimiento mayor o bien acontece un ablandamiento de la matriz. En las aleaciones de Al-Si ocurre un buen endurecimiento en el rango de magnesio de 0.4 a 0.07%.

### Preparación de la carga

La carga de materiales para la producción de las aleaciones usando aluminio reciclado está constituida por uno o varios de los tipos de chatarra o residuos en la proporción apropiada para satisfacer los requerimientos de la composición química de acuerdo al balance metalúrgico de materiales como el que se presenta a continuación: el contenido es igual al peso del material por su ley o composición química y la distribución es el contenido entre la suma de contenidos.

Después de calcular la cantidad de cada uno de los materiales se podrá observar la falta o excedente de los elementos químicos

**Tabla 2.** Balance metalúrgico.

Material	Peso (kg)	Composición %						Contenido					
		Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
<b>Macizo</b>	-	10.56	2.8	0.57	0.22	0.16	1.04						
<b>Blando</b>	-	0.93	0.12	0.41	0.52	0.181	0.126						
<b>Aleación Al 380</b>	1000	7.5-9.5	3-4	2.0	0.1	0.5	3.0						

**Fuente:** elaboración propia.

que la aleación requiere tener. En el caso de que falte algún elemento químico se adicionan aleantes que proporcionan la cantidad faltante, en caso de que exista un exceso de algún elemento químico se adiciona algún escorificante durante la práctica de la fusión o se usa el concepto de dilución que consiste en adicionar algún material con menor contenido del elemento en exceso para diluir su contenido.

## Practica de fusión

Durante la fusión de aluminio para la producción de aleaciones influyen factores como tipo de horno, combustible, temperatura de proceso, materia prima, aleantes, fundentes, carga de materiales, homogenización del baño, tiempo de proceso, escorificación, temperatura de vaciado, entre otros factores.

Los cambios de estado sólido a estado líquido y de estado líquido a estado sólido son procesos endotérmico y exotérmico que requiere en primer lugar de un combustible que puede ser gaseoso, (gas metano) o líquido, combustible alterno, para aportar la energía requerida. La energía necesaria para fundir aluminio es 1060 kJ/kg, se requieren 484 kJ/kg para calentar aluminio de 20 a 425 Celsius, y se requieren 186 kJ/kg para aumentar la temperatura de 425 a 660 C.

Previo a la carga del material al horno debe realizarse una etapa de limpieza de hierro con imán, así como otros metales como antimonio, magnesio entre otros. Durante la carga manual de residuos al horno debe retirar las piezas que contengan antimonio, etc. que no fueron separadas durante la etapa de limpieza. La carga del horno debe realizarse en forma tal que no se dañe el ladrillo refractario y no haya pérdidas de alu-

minio durante la incorporación de material de tamaño fino.

Se debe tener cuidado de que el material por fundir no tenga humedad, ni agua para evitar posibles explosiones. Es importante considerar que el aluminio puede reducir óxidos metálicos como sílice, hierro y otros que pueden representar un problema de contaminación. Es importante que a una muy elevada temperatura o la flama directa al Aluminio lo pueden oxidar contribuyendo en esta forma a la pérdida de Aluminio. Durante la fusión del material el aluminio fundido por ser más ligero, tiende a flotar y el aluminio menos caliente y el no fundido permanece en la parte del fondo del horno. Debido a esto debe haber agitación, manual, por diseños del horno, o bombas de recirculación para aumentar la rapidez de fusión. Evidentemente el uso de bombas de recirculación aumenta considerablemente la rapidez de fusión del aluminio hasta 30%.

Durante la fusión de la carga de aluminio lo que primero en formar es un lodo y/o una mezcla de sólido-líquido. De este lodo se realiza una separa del material más fluido, el aluminio y magnesio, dejando un residuo que comúnmente está constituido por hierro, manganeso, cromo, silica, cobre entre otros que debido a su punto más alto de fusión son los últimos en hacerse líquidos, aunque también pueden permanecer como lodo en el fondo del horno. Existen maneras numéricas de estimar la formación de lodos basadas en la experiencia y que pueden no ser aplicables para todas las situaciones, esto es el Factor de lodos, SF sludge factor, el cual define la formación y precipitación de los sólidos en función de la composición química y de la temperatura. Se utiliza comúnmente en procesos die casting,  $SF = \% Fe + 2\% Mn + 3\% Cr$ , si SF es mayor a 1.8 existe tendencia a formar lodos.

Como se ha mencionado durante la carga de material al horno los óxidos, que son más ligeros que el baño de aluminio, van a flotar mientras que los más pesados permanecen en el baño. Por lo anterior se presentan varios problemas: hay un atrapamiento de gotas de aluminio en el residuo de óxidos o dross flotante por lo que es necesario un buen escoriado para evitar o reducir esta pérdida; también, este dross puede generar suficiente calor que puede oxidar el aluminio; estos óxidos se depositan en las paredes del horno disminuyendo el área útil; puede afectarse la calidad de la aleación que se produce.

El aluminio es un metal químicamente muy activo, y su actividad aumenta con la elevación de la temperatura del baño, por lo que es mejor trabajar a la menor temperatura posible todo el tiempo. Una regla práctica consiste en trabajar 60 C arriba de la temperatura de vaciado.

La oxidación de aluminio se duplica con la temperatura entre 770 y 800 C, y el contenido de hidrogeno aumenta hasta 50% entre 740 y 770 C, además que el efecto de los refinadores de grano es menor a elevadas temperaturas.

El calentamiento del horno previo a la incorporación del material que se va a fundir es importante para que el refractario se expanda y cierre grietas donde se puede insertar el aluminio líquido. El uso de chatarra precalentada disminuye el tiempo de fusión. En ambas situaciones se aumenta el tiempo de vida útil del horno.

Durante la adición de los aleantes, el silicio va a tender a flotar por lo que se necesita agitar el baño durante su adición para evitar oxidación superficial y por lo tanto pérdida de silicio. Al adicionar metales pesados

como el cobre se depositarán el fondo del horno y se dificulta su disolución por lo que es necesario agitar el baño o mantener el cobre suspendido en el baño.

Es común el atrapamiento de gotas de aluminio y de elementos de aleación en el dross que se produce durante la fundición de chatarra o escoria de aluminio. Es común que el aluminio sea recuperado de la escoria extendiendo la escoria caliente sobre una placa de acero o sobre el piso y una vez fría la escoria se pepena el aluminio. Otra forma de recuperar el aluminio consiste en vaciar la escoria en un contenedor con piqueta por donde se escurre el aluminio líquido previa agitación manual o mecánica. También se recupera aluminio de la escoria volviendo a cargarla al horno y mediante agitación promoverla coalescencia de las gotas de aluminio que están en la escoria o bien incorporando la escoria en un baño de sales fundidas para evitar la pérdida de aluminio por oxidación.

## Costos

El aluminio secundario que se consume en México se produce procesando chatarra y subproductos de las diferentes áreas de la industria nacional. El precio de esta materia prima está gobernada por la oferta y la demanda del mercado nacional del día de la compra, por ejemplo, el 23 de agosto del 2024 el kilo de chatarra tipo macizo es de \$38.00, el kilo de chatarra tipo rin es de \$47.00, el kilo de chatarra tipo blando es \$30.00, el kilo de perfil \$ 40.00. Los elementos aleantes como el silicio el mismo día tiene un precio de \$ 53.00 y el cobre de \$ 130.00. El precio del combustible alterno es de \$5.00 a 6.00 / litro, mientras que el costo de operación básica es de \$4.00 a 7.00 pesos por kilo de aleación de aluminio producido. La cotización del aluminio como la de los

metales está determinada por el mercado internacional y la oferta y demanda nacional. Globalmente los precios de referencia del aluminio comúnmente usados son las cotizaciones LME, London metal Exchange y Pratz . El precio de aluminio 99.5 % de pureza a esa fecha es de 2349.00 dólares por tonelada, mientras que el precio de la aleación 380 es de \$52.00 pesos el kilogramo y el precio de la aleación \$356 es de \$61.00 pesos el kilogramo.

La idea de presentar estos datos, que pueden tener variaciones, es poder tener una visión de costos que inciden durante el aprovechamiento de los residuos de aluminio

## Reconocimientos

Quiero agradecer a los colegas profesionistas, que en algún momento algunos de ellos fueron mis alumnos ,las aportaciones que han proporcionado para la elaboración de estos dos documentos del reciclaje de Aluminio.

## Referencias

- J. Newton, An introduction to metallurgy, John Wiley and sons, inc. second edition, 1948.
- C.B. Alcock, Principles of pyrometallurgy, Academic press inc. , 1976.
- M. Iraizoz, "Tratamiento de escoria en Alvar", Congreso SAM/CONAMET 2007 1848-1852.
- R.D. Peterson "review of aluminium dross processing, light metals 2002", 1029-1037.
- R.R. Ray, y. Sahai, "The role of salt flux in recycling of aluminium light metals 1998" 1237-1243.
- Situación del aluminio en el mundo y en México, G. Morales P., W. Avelino, J. Pérez, R. Ambriz, D. Jaramillo , [www.cidproc.com](http://www.cidproc.com).
- ASM Handbook, volume 15 casting, 1992.