

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE ALEACIONES 380 BASE ALUMINIO, PARTIENDO DE CHATARRAS INDUSTRIALES EN HORNO TIPO REVERBERO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

CARLOS DAVID AYALA VILLALOBOS



MÉXICO, D.F.

2013



Universidad Nacional Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

| PRESIDENTE: | Profesor: I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco |
|-------------|---|
| | |

VOCAL: Profesor: Dr. José Alejandro García Hinojosa

- SECRETARIO: Profesor: Dr. Carlos González Rivera
- 1er. SUPLENTE: Profesor: I.Q.M. Arturo Alejandro Sánchez Santiago
- 2° SUPLENTE: Profesor: Dr. Héctor Cruz Mejía

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

- > INDUSTRIAL LIGAS METÁLICAS S.A. DE C.V.
- LABORATORIO DE INGENIERÍA DE FUNDICIÓN, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

I.Q.M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

SUPERVISOR TÉCNICO:

I.Q.M. EDUARDO HERNÁNDEZ TINOCO

SUSTENTANTE:

CARLOS DAVID AYALA VILLALOBOS

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

A mi familia, ya que con su apoyo me han impulsado a salir adelante y también porque han sido la principal razón que me ha hecho luchar en la vida y no decaer en los momentos difíciles.

Además por haberme apoyado a lo largo de todos estos años en mi etapa estudiantil. A mi madre por esos desvelos que tenía que pasar por levantarse temprano para darme de desayunar, y tener que esperarme a que regresara a casa hasta tarde para poder darme de cenar.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, específicamente a la Facultad de Química, por la oportunidad que me brindo de haber estudiado en la mejor universidad del país.

A Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V., especialmente al Sr. Rafael López Martín y Gabriel López Martín por haberme abierto las puertas a su empresa y darme la oportunidad de complementar mi formación como Ingeniero al realizar esta tesis en sus instalaciones. Además a Omar Beltrán Guerrero por su apoyo en la parte experimental de esta tesis. Y en general a todo el personal de Ligas, Marina, Ing. Gregorio Perdomo, Gabys, Geras, Ing. Luis Suari, Daniel Espitia, Charlie, ya que de alguna u otra manera me ayudaron a realizar este trabajo en la empresa.

Al IQM Eduardo H. Tinoco por creer en mí y darme la posibilidad de trabajar con usted, además de su motivación y amistad que siempre me brindo.

Al IQM Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco por haberme guiado en la realización de esta tesis, por sus consejos, por su paciencia y por la disponibilidad que siempre tuvo conmigo.

Al Dr. José Alejandro García Hinojosa por sus enseñanzas a lo largo de mi carrera profesional, y por el apoyo en la realización de este trabajo.

Al Dr. Carlos González Rivera por dedicar parte de su tiempo en la revisión de esta tesis, por sus recomendaciones y aportaciones para mejorar este trabajo.

Al M. en I. Agustín Gerardo Ruíz Tamayo por su apoyo, consejos y amistad que me brindo siempre.

Además a todos los Profesores del Departamento de Metalurgia por haberme transmitido sus conocimientos y consejos en todas las materias que curse con ustedes, en especial al M. en C. Antonio Huerta Cerdán, Ing. Juan Manuel de la Rosa Canales, Ing. Arturo Alejandro Sánchez Santiago, etc.

A todos mis amigos y compañeros de la Universidad con los cuales compartí agradables momentos tanto en las clases como afuera de ellas, Kuri, Abril, Koko, Gaby, Erika, Ángel, Cristian, Montse, Arturo, Laura, Andrés, etc.

ÍNDICE

| CONTENIDO | PÁGINA |
|---|--------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVOS | 2 |
| HIPÓTESIS | 2 |
| CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO | |
| 1.1 EL CICLO DE VIDA DEL ALUMINIO | 3 |
| 1.1.1 MINERALES DE BAUXITA EN EL MUNDO | 3 |
| 1.1.2 MINERALES DE ALUMINIO EN MÉXICO | 7 |
| 1.1.3 PRODUCCIÓN DE ALÚMINA | 9 |
| 1.1.4 FUSIÓN PRIMARIA | 11 |
| 1.1.5 CLASIFICACIÓN DE ALEACIONES BASE ALUMINIO | 13 |
| 1.1.6 FABRICACIÓN DE PRODUCTOS | 17 |
| 1.1.7 RECICLAJE DE PRODUCTOS | 27 |
| 1.2 CHATARRAS DE ALUMINIO, CLASIFICACIÓN, SELECCIÓN Y TRATAMIENTO | 29 |
| 1.2.1 PROCESO DE RECICLAJE DEL ALUMINIO | 29 |
| 1.2.2 CHATARRA NUEVA | 33 |
| 1.2.3 CHATARRA VIEJA | 34 |
| 1.2.4 PRE-TRATAMIENTO DE LA CHATARRA | 53 |
| 1.2.5 MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE LA CHATARRA | 57 |
| 1.3 FUSIÓN DE ALUMINIO SECUNDARIO | 62 |
| 1.3.1 FUNDAMENTOS DE LOS HORNOS FUSORES | 62 |
| 1.3.2 TIPOS DE HORNOS FUSORES PARA ALUMINIO Y SUS ALEACIONES | 68 |
| 1.3.3 PARÁMETROS DE FUSIÓN EN LOS HORNOS FUSORES | 75 |
| 1.3.4 CONSIDERACIONES PARA LA FUSIÓN DE ALUMINIO SECUNDARIO | 81 |
| 1.4 PROCESO DE ALEACIÓN DEL ALUMINIO | 83 |
| 1.4.1 TIPOS DE ALEACIONES | 84 |
| 1.4.2 TEORÍA DE FORMACIÓN DE ALEACIONES | 87 |
| 1.4.3 ALEANTES PRINCIPALES DE LAS ALEACIONES 380 Y AISi9Cu3 | 94 |
| 1.4.4 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS ALEACIONES TRATADAS | 96 |
| 1.4.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS ALEANTES | 96 |
| 1.4.6 EFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES | 97 |
| 1.5 OXIDACIÓN Y GENERACIÓN DE ESCORIA | 101 |
| 1.5.1 OXIDACIÓN DEL ALUMINIO | 102 |
| | |

| 1.5.2 GENERACIÓN DE ESCORIA | 102 |
|-----------------------------|-----|
| 1.5.3 TIPOS DE ESCORIAS | 104 |

CAPÍTULO 2. CASO DE ESTUDIO. PLANTEAMIENTO

| 2.1 CHATARRAS TÍPICAS UTILIZADAS EN LA EMPRESA | 106 |
|---|-----|
| 2.1.1 CHATARRAS DE CONFORMADO | 106 |
| 2.1.2 CHATARRAS DE FUNDICIÓN | 107 |
| 2.2 TÉCNICA DE FUSIÓN | 107 |
| 2.2.1 SECUENCIA DE CARGA | 108 |
| 2.2.2 ELEMENTOS QUE SE AJUSTAN TÍPICAMENTE PROVENIENTES DE CHATARRA | |
| DE FUNDICIÓN | 110 |
| 2.2.3 INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE CHATARRA DE CONFORMADO Y FUNDICIÓN | |
| CARGADA, PARA EL AJUSTE DE LOS ELEMENTOS ALEANTES | 111 |
| 2.2.4 AJUSTE DEL SILICIO | 113 |
| 2.2.5 AJUSTE DEL COBRE | 115 |

CAPITULO 3. EXPERIMENTACIÓN

| 3.1 ANÁLISIS TÉRMICO | 116 |
|------------------------|-----|
| 3.1.1 EQUIPO UTILIZADO | 116 |
| 3.1.2 PROCEDIMIENTO | 117 |
| 3.2 ANÁLISIS CINÉTICO | |
| 3.2.1 EQUIPO UTILIZADO | 117 |
| 3.2.2 PROCEDIMIENTO | 118 |

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

| 4.1 ANÁLISIS TÉRMICO | 120 |
|---|-----|
| 4.1.1 CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LA ALEACIÓN 380 | 120 |
| 4.1.2 CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LA ALEACIÓN AISi9Cu3 | 121 |
| 4.2 CINÉTICA DE DISOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES | 123 |
| 4.2.1 CINÉTICA DE DISOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN UNA ALEACIÓN 380 | 123 |
| 4.2.2 CINÉTICA DE DISOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN UNA ALEACIÓN AlSi9Cu3 | 130 |
| 4.2.3 MODO Y EFECTO DE LA AGITACIÓN | 135 |
| 4.2.4 SECUENCIA DE CARGA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES | 136 |
| 4.2.5 RAPIDEZ DE DISOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES | 137 |
| | |

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

| 5.1 CONCLUSIONES | 145 |
|------------------|-----|
| 5.2 BIBLIOGRAFÍA | 146 |

➢ INTRODUCCIÓN

El aluminio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, encontrándose normalmente en forma de silicato de aluminio puro o mezclado con otros metales y como óxidos, pero nunca como metal libre. Los silicatos no son menas útiles porque es extremamente difícil y por tanto muy caro, extraer el aluminio de ellas.

En la producción de aluminio la principal materia prima es la bauxita, que llega a contener al menos 40% de óxido de aluminio. En el mundo existen numerosos depósitos de bauxita principalmente en las zonas tropicales y subtropicales del mundo.

Usualmente se requieren de 4 a 6 toneladas de bauxita para producir una tonelada de aluminio, lo que provoca una gran deforestación durante su extracción. En México a pesar de que se refina alúmina no existen yacimientos de bauxita por lo que se tiene que importar.

Por este motivo la recuperación de chatarra de aluminio en México se ha vuelto una importante fuente de obtención de aluminio, además de que la fusión de la chatarra solo requiere un 5% de la energía total que se necesita para producir aluminio a partir de la bauxita. La producción de una tonelada métrica de aluminio a partir de bauxita requiere alrededor de 17000 kWh de electricidad, mientras que la misma cantidad producida a partir de aluminio reciclado consume alrededor de 750 kWh, con el aluminio reciclado se obtiene una ganancia de 95% en ahorro de energía en comparación con el aluminio primario.

Otro aspecto positivo del reciclaje de aluminio es el impacto ambiental. La producción de una tonelada de aluminio primario requiere alrededor de cuatro toneladas de bauxita y produce cerca de dos toneladas de lodos rojos. Paralelamente a la generación de lodos rojos, la producción de aluminio primario también libera flúor.

En un proceso típico de reciclado de aluminio, la chatarra es limpiada, seleccionada, alimentada y cargada dentro de un horno de reverbero, para ser fundida, escoriada y aleada según la composición deseada. La dificultad en tal proceso es debido no solo al efecto de las altas temperaturas y a las reacciones químicas complejas, sino también a las grandes diferencias entre los tipos de chatarras de aluminio como son: composición química, tamaño, forma, recubrimientos y contaminantes.

Mejorando cada una de las etapas del reciclado de chatarra de aluminio se ve beneficiado el rendimiento metalúrgico, la calidad superficial de los lingotes o piezas obtenidas, la homogenización del aluminio líquido, los tiempos de fusión, además de disminuir las cantidades de elementos aleantes utilizados para conseguir la composición química deseada. La implementación de mejoras en cada una de las etapas del proceso de reciclado impacta directamente en los parámetros antes mencionados, lo que a su vez reduce el costo de la fusión de chatarra de aluminio.

> HIPÓTESIS

El conocimiento y control de los parámetros de fusión aumentará los rendimientos y la velocidad de fusión.

> OBJETIVOS

-ESTABLECER LAS DIFERENCIAS QUE EXISTEN ENTRE LA CHATARRA DE FUNDICIÓN Y LA DE CONFORMADO EN TÉRMINOS DE CONTENIDOS DE ALEANTES

-ESTABLECER LA TEMPERATURA DE TRABAJO MÁS ADECUADA PARA LAS ALEACIONES 380 Y AISi9Cu3

-ESTABLECER LA MEJOR SECUENCIA DE CARGA DE LOS ALEANTES SI Y CU Y EXPLICAR EL EFECTO DEL PRECALENTAMIENTO DEL ALEANTE COBRE, SOBRE LA RAPIDEZ DE DISOLUCIÓN

-ESTABLECER LOS TIEMPOS REQUERIDOS PARA QUE LA COMPOSICIÓN DEL BAÑO SE ESTABILICE DESPUÉS DE LA ADICIÓN DE ALEANTES

-DETERMINAR EL EFECTO DE LA AGITACIÓN

> PARÁMETROS DE FUSIÓN A EXPERIMENTAR

-SECUENCIA DE CARGA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

-TEMPERATURA DE TRABAJO

-TIEMPO Y MODO DE AGITACIÓN

-CARGAS DE ELEMENTOS ALEANTES A UTILIZAR

> CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 EL CICLO DE VIDA DEL ALUMINIO

1.1.1 MINERALES DE BAUXITA EN EL MUNDO

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno y el silicio, y constituye el 7,3% de su masa. En su forma natural, sólo existe en una combinación estable con otros materiales (particularmente en sales y óxidos).

Aunque el aluminio es uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre (invariablemente como alúmina o alguna otra forma de óxido combinado) cualquier depósito mineral utilizable debe ser fácilmente susceptible al beneficio, de modo que un óxido de aluminio puro se pueda obtener. Sin embargo, el beneficio físico de los óxidos no ha tenido mucho éxito. Por consiguiente el procesamiento químico ha sido siempre necesario para extraer la alúmina pura de los demás componentes asociados con ella en el depósito. Cualquier beneficio químico debe estar basado en la eliminación selectiva de cualquiera de los óxidos de aluminio o los otros componentes. Sin embargo, frecuentemente los otros óxidos son químicamente similares, y este problema se ve agravado por el comportamiento anfótero de aluminio, lo que hace extremadamente difícil el eliminar selectivamente las impurezas (o "ganga"). Por lo tanto los procesos de beneficio se basan generalmente en la disolución selectiva de óxido de aluminio.

Las bauxitas contienen formas hidratadas de óxido de aluminio, y por lo tanto son las fuentes mineralógicas económicamente más susceptibles para producir alúmina. Se presentan en diferentes formas estructurales, dependiendo del número de moléculas de agua y también la forma cristalina. El nombre de "bauxita" se deriva de la aldea de Les Baux en el sur de Francia, donde fue explotado comercialmente por primera vez el mineral.

Las bauxitas provienen de rocas de montaña, del cual el componente principal es el óxido de aluminio. La bauxita contiene un gran número de impurezas tales como óxidos de sílice, hierro, titanio y varios otros elementos en su mayoría en cantidades menores. La cantidad de óxido de aluminio libre puede variar. Los minerales de bauxita viables económicamente contienen más de 45% de alúmina, menos de 12% óxido de hierro y menos del 8% de sílice. La densidad aparente de la mayoría de bauxitas esta entre 1.3 y 1.9 g/cm³. La clasificación general de las rocas de bauxita en base a su estructura química se representa en la Tabla 1.

| Tipo de Bauxita | Gibsita | Bohemita | Diásporo |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Composición | $AI_2O_3 \bullet 3H_2O$ | $AI_2O_3 \bullet 3H_2O$ | $AI_2O_3 \bullet 3H_2O$ |
| Contenido máximo de alúmina (%) | 65.4 | 85 | 85 |
| Sistema cristalino | Monoclínico | Ortorrómbico | Ortorrómbico |
| Densidad (g/cm ³) | 2.42 | 3.01 | 3.44 |

Tabla 1. Comparación de diferentes bauxitas.

El dióxido de silicio es la principal impureza perjudicial en las bauxitas. Está presente en la forma de sílice libre o como un compuesto con otros elementos.

Las rocas de nefelina son el segundo tipo más importante de mineral de aluminio después de la bauxita. Estas rocas de mineral contienen Na[AlSiO₄]. La composición teórica de la nefelina es 35.7% Al₂O₃, 42.4% de SiO₂ y 21.9% de Na₂O. Hay muchos tipos diferentes de rocas de nefelina.

La alunita es también una importante materia prima para la producción de aluminio. Pertenece al grupo del sulfato de aluminio. La composición química de este mineral puede variar considerablemente.

La composición teórica de la alunita es un 37.0% en peso de Al_2O_3 , 11.4% en peso de K_2O , 38.6% en peso de SO₃, 13.0% en peso de H_2O . Además de los compuestos anteriores, SiO₂, CaO y Fe₂O₃ pueden estar presentes.

La distena (cianita) es un mineral de alta calidad para la reducción electrotérmica de aluminio. Los minerales de este grupo presentan modificaciones polimórficas de la sustancia con la fórmula química de AlOAI[SiO₄]. Su composición química teórica es de 63.2% de Al₂O₃ y 36.8% de SiO₂.

En la actualidad, virtualmente todo el aluminio en el mundo es producido a partir de la bauxita, mediante la combinación de los procesos de Bayer y de Hall-Heroult.

La bauxita es un mineral de elevado contenido de aluminio, que a la fecha todavía es de bajo precio y del cual se tienen yacimientos en diversas regiones de la tierra. Los recursos mundiales de bauxita se encuentran distribuidos por todo el mundo. Hay solamente siete áreas ricas en bauxita: África Central y Occidental (principalmente Guinea), Sudamérica (Brasil, Venezuela y Suriname), el Caribe (Jamaica), Oceanía y el Sur de Asia (Australia e India), China, el Mediterráneo (Grecia y Turquía), y los Urales (Rusia).



Figura 1. Mapa de la localización de las áreas ricas en bauxita de alta calidad.¹

La bauxita está compuesta principalmente de óxido de aluminio hidratado acompañado de varias impurezas tales como, óxido de hierro, aluminosilicatos, dióxido de titanio, cuarzo y compuestos de fósforo y vanadio. Por tal motivo la bauxita no puede ser considerada como una especie mineral bien definida sin embargo, se ha acostumbrado denominar así a los minerales en los cuales la alúmina representa un alto porcentaje de su composición.

Existen diversas variedades de bauxita y la clasificación general más utilizada está basada en el grado de hidratación de la alúmina que ellas contienen. De acuerdo con esto se identifican dos grupos:

1. Bauxitas monohidratadas, las cuales contienen la alúmina hidratada de fórmula AlO(OH), y se presentan en las formas mineralógicas de bohemita y diáspora.

2. Bauxitas trihidratadas, las cuales contienen la alúmina hidratada de fórmula Al(OH)₃ y reciben los nombres de gibsita o hidrargilita.

Esta clasificación es de gran importancia práctica, debido a que la mayoría de los procesos para extraer alúmina a partir de bauxita están basados en la disolución del mineral en hidróxido de sodio, en el cual los trihidratos de aluminio son mucho más solubles que los monohidratos. Un aspecto importante a considerar además del contenido de alúmina para fines de establecer un proceso de extracción, es el contenido de impurezas, especialmente sílice.

Sin embargo, los costos de transportación e importación y el inevitable agotamiento de las reservas mundiales, ha orillado desde hace varias décadas a la búsqueda de materias primas alternativas. México, no obstante que no cuenta con yacimientos de bauxita, posee importantes yacimientos de minerales de baja ley en aluminio, del tipo de aluminosilicatos y especialmente del grupo del caolín.

La alúmina (Al₂O₃), materia prima básica para la producción de aluminio, se encuentra ampliamente distribuida y representa aproximadamente el 15% de la corteza terrestre. Sin embargo, por ahora, sólo la variedad mineral denominada bauxita se considera comercialmente como fuente para la extracción de alúmina.

En la tabla 2 y 3 se presentan los datos de la producción mundial de aluminio primario y las importaciones de alúmina, aluminio y bauxita en México, respectivamente.

| (Miles de toneladas métricas) | | | | | |
|-------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| País | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
| Argentina | 273 | 271 | 394 | 410 | 415 |
| Australia | 1,932 | 1,957 | 1,974 | 1,943 | 1,928 |
| Azerbaiyán | 32 | 39 | 40 | 30 | 30 |
| Bahréin | 872 | 865 | 872 | 848 | 870 |
| Bosnia y Herzegovina | 121 | 122 | 123 | 96 | 118 |
| Brasil | 1,605 | 1,655 | 1,661 | 1,536 | 1,536 |
| Camerún | 88 | 87 | 91 | 73 | 76 |
| Canadá | 3,051 | 3,083 | 3,120 | 3,030 | 2,963 |
| China | 9,360 | 12,600 | 13,200 | 12,900 | 16,200 |
| Egipto | 252 | 258 | 260 | 265 | 266 |
| Francia | 442 | 428 | 389 | 345 | 356 |
| Alemania | 516 | 551 | 606 | 292 | 394 |
| Ghana | 8 | | | | |
| Grecia | 163 | 166 | 160 | 130 | 130 |
| Hungría | 34 | | | | |
| Islandia | 320 | 398 | 787 | 785 | 780 |

Tabla 2. Producción Mundial de Aluminio Primario por País²

Continuación de Tabla 2.

| (Miles de toneladas metricas) | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| País | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
| India | 1,105 | 1,222 | 1,308 | 1,400 | 1,450 | |
| Indonesia | 250 | 242 | 243 | 250 | 252 | |
| Irán | 205 | 216 | 248 | 250 | 250 | |
| Italia | 194 | 183 | 180 | 171 | 168 | |
| Japón | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | |
| Kazajstán | | 12 | 106 | 127 | 227 | |
| Montenegro | 122 | 124 | 107 | 64 | 80 | |
| Mozambique | 564 | 564 | 536 | 545 | 557 | |
| Holanda | 312 | 301 | 301 | 300 | 300 | |
| Nueva Zelanda | 337 | 353 | 316 | 271 | 344 | |
| Nigeria | | | 11 | 13 | 21 | |
| Noruega | 1,331 | 1,357 | 1,358 | 1,130 | 800 | |
| Omán | | | 49 | 351 | 367 | |
| Polonia | 58 | 54 | 48 | | | |
| Qatar | | | | 10 | 190 | |
| Rumania | 256 | 283 | 265 | 201 | 207 | |
| Rusia | 3,718 | 3,955 | 4,190 | 3,815 | 3,947 | |
| Eslovaquia | 158 | 160 | 163 | 150 | 163 | |
| Eslovenia | 118 | 111 | 83 | 35 | 40 | |
| Sudáfrica | 895 | 899 | 811 | 809 | 807 | |
| España | 349 | 408 | 408 | 360 | 340 | |
| Suecia | 101 | 98 | 112 | 70 | 93 | |
| Suiza | 12 | | | | | |
| Tayikistán | 414 | 419 | 339 | 359 | 349 | |
| Turquía | 60 | 65 | 65 | 35 | 60 | |
| Ucrania | 113 | 113 | 113 | 50 | 25 | |
| Emiratos Árabes Unidos | 861 | 890 | 948 | 1,010 | 1,400 | |
| Reino Unido | 360 | 365 | 326 | 253 | 186 | |
| Estados Unidos | 2,284 | 2,554 | 2,658 | 1,727 | 1,726 | |
| Venezuela | 610 | 610 | 610 | 410 | 335 | |
| Total | 33,900 | 38,000 | 39,600 | 36,900 | 40,800 | |
| | | | | | | |

(Miles de toneladas métricas)

| Tabla 3. Importaciones | de alúmina, alumin | o y bauxita en México | $(1994-2001)^3$ |
|------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
|------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|

| | Aluminio Miles Tons. | Alúmina Miles Tons. | Bauxita Miles Tons. | Aluminio Millones USD | Alúmina Millones USD | Bauxita Millones USD |
|------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1994 | 84.276774 | 60.156439 | 18.945735 | 136.89791 | 20.73643 | 2.34903 |
| 1995 | 13.877357 | 93.198738 | 41.740857 | 21.61154 | 27.84808 | 4.97675 |
| 1996 | 13.693957 | 112.480002 | 24.586214 | 21.61154 | 37.7152 | 3.19521 |
| 1997 | 32.693423 | 191.811403 | 53.890607 | 49.51555 | 55.97041 | 5.72189 |
| 1998 | 31.990318 | 233.075579 | 42.232124 | 46.16273 | 59.33469 | 3.84199 |
| 1999 | 21.588677 | 209.683642 | 33.021812 | 32.26695 | 54.6698 | 3.71469 |
| 2000 | 19.433162 | 79.308705 | 46.102004 | 32.90849 | 33.57613 | 4.43021 |
| 2001 | 20.13173 | 106.855133 | 27.947891 | 32.17326 | 33.6361 | 3.05969 |



Figura 2. Importaciones de Aluminio, Alúmina y Bauxita en México de 1994 a 2001 (Miles de Toneladas)³.

Tabla 4. Producción de Aluminio Secundario en México⁴

| (Toneladas métricas) | | | | | |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|--|
| METAL | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | |
| Aluminio Secundario | 574,100 | 600,000 | 600,000 | 600,000 | |

Como puede observarse en la figura 2 y la tabla 3, en la década pasada las importaciones de alúmina presentaron un constante incremento, disminuyendo en los últimos años posiblemente por las crisis financieras, de manera similar ocurre para el aluminio y la bauxita; la información mostrada resalta la necesidad de buscar alternativas que puedan reducir estas importaciones.

1.1.2 MINERALES DE ALUMINIO EN MÉXICO

Alternativos a los minerales bauxíticos, los aluminosilicatos de baja ley y en particular los del grupo del caolín; que en México existen con cierta abundancia, representan la materia prima más viable para la obtención de alúmina, sin embargo, aparte de tener un menor porcentaje de aluminio, éste se encuentra formando parte de estructuras cristalinas que imponen limitaciones para su extracción, creando la necesidad de implementar tratamientos previos al mineral y de suministrar condiciones de lixiviación más enérgicas.

Los procesos conocidos de extracción de aluminio a partir de arcillas son usualmente de economía marginal; el costo para obtener aluminio de fuentes locales puede, en algunos casos, no ser competitivo con el costo del material importado o reciclado.

LOS MINERALES DEL GRUPO DEL CAOLÍN

Los minerales del grupo del caolín Al₄Si₄O₁₀(OH)₈ (caolinita, dickita, nacrita y halloisita), silicato de aluminio hidratado, se encuentra en yacimientos creados a partir de la descomposición de rocas feldespáticas cuyas propiedades lo hacen ideal para diversas aplicaciones dentro de múltiples tipos de industrias. México es uno de los países en los que se encuentran yacimientos de caolín, los estados que poseen mayor cantidad en su territorio son: Veracruz, Guanajuato, e Hidalgo, y en menor grado: Zacatecas, Jalisco, Chihuahua y Querétaro.

Por desgracia el caolín puro se encuentra en pocas cantidades en la naturaleza, la mayor parte de éste mineral que se halla en los yacimientos naturales presenta diversas impurezas (principalmente óxidos de titanio y de fierro) que afectan sus propiedades y hace que no pueda ser usado directamente, lo que hace necesario que se implementen métodos de purificación para que pueda ser explotado de forma industrial y que aumente su valor agregado.

LOS MINERALES DEL GRUPO DE LA ALUNITA

En México hay una gran abundancia de yacimientos minerales no metálicos como la alunita, es un sulfato de potasio y aluminio, de origen hidrotérmico cuya fórmula condensada es K_2SO_4 Al_2 (SO_4)₃ $4Al(OH)_3$. Se le considera como un mineral que es representativo de los minerales que se reconocen dentro del "Grupo de la alunita" entre los que se encuentran además de la alunita, la natroalunita, la hidrogenoalunita, la amonoalunita; en donde el Potasio se sustituye por los iones sodio, hidrógeno y amonio respectivamente. Así mismo el sulfato de aluminio puede ser sustituido por el sulfato férrico y generar la familia de las jarositas.

La composición porcentual teórica de los constituyentes de algunos minerales del grupo de la alunita, expresados como óxidos, se especifican en la siguiente tabla:

| Compuesto | K ₂ O | Na ₂ O | NH ₃ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | H ₂ O |
|---------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|
| Alunita | 11.37 | | | 36.92 | | 38.66 | 13.05 |
| Natroalunita | | 7.79 | | 38.41 | | 40.22 | 13.58 |
| Amonoalunita | | | 4.32 | 38.92 | | 40.71 | 13.74 |
| Jarosita | 9.40 | | | | 47.83 | 31.97 | 10.80 |
| Natrojarosita | | 6.59 | | | 49.42 | 33.03 | 11.15 |

Tabla 5. Composición teórica expresada como óxidos de algunos minerales del grupo de la alunita³

Los contenidos de sulfato de potasio, alúmina y anhídrido sulfúrico en la alunita pura son los compuestos de interés económico en este mineral. Si los contenidos de sodio y hierro que sustituyen al potasio y al aluminio son menores del 1 % se consideran como impurezas. La alunita se presenta generalmente en forma masiva y de textura granular, a menudo se le encuentra mezclada con otros minerales, especialmente caolín, haloisita o diáspora y raramente se le encuentra en forma cristalizada.

1.1.3 PRODUCCIÓN DE ALÚMINA

De los procesos desarrollados para extraer alúmina a partir de bauxita, el más utilizado en la actualidad es el proceso Bayer, en el cual la mezcla de hidróxidos de hierro y aluminio (mineral bauxítico) es solubilizado mediante hidróxido de sodio. Las impurezas que acompañan al sólido son eliminadas y la alúmina es separada por cristalización del trihidróxido (hidrato de Bayer), el cual es gibsita. La solución alcalina es reciclada, concentrada y reutilizada, el proceso se orienta a obtener un producto fácilmente filtrable y calcinable.

Anualmente se producen grandes cantidades de alúmina a partir de bauxita para la producción de aluminio metálico, lamentablemente nuestro país requiere importar prácticamente el 100% de ésta materia prima para producir el aluminio que requerimos.

| País | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Azerbaiyán | 314 764 | 362 665 | 184 500 | 164 879 | 9 590 |
| Bosnia & Herzegovina | 447 260 | 393 580 | 303 799 | 294 455 | 191 792 |
| Francia | 600 000 | 636 000 | 600 000 | 572 000 | 317 000 |
| Alemania | 830 000 | 850 000 | 900 000 | 900 000 | 900 000 |
| Grecia | 782 000 | 780 000 | 761 746 | 771 769 | 718 797 |
| Hungría | 305 000 | 301 000 | 301 000 | 299 000 | 185 000 |
| República de Irlanda | 1 800 000 | 1 800 000 | 1 800 000 | 1 890 000 | 1 240 000 |
| Italia | 1 070 000 | 1 090 000 | 1 327 000 | 1 045 000 | 92 000 |
| Montenegro | | 236 740 | 240 186 | 220 426 | 58 528 |
| Rumania | 689 329 | 622 083 | 22 830 | 344 | 44 000 |
| Rusia | 3 259 216 | 3 265 216 | 3 332 308 | 3 112 000 | 2 794 000 |
| Serbia y Montenegro | 235 196 | — | — | — | |
| España | 1 400 000 | 1 400 000 | 1 300 000 | 1 300 000 | 1 300 000 |
| Turquía | 112 558 | 150 117 | 163 435 | 150 000 | 150 000 |
| Ucrania | 1 632 020 | 1 671 620 | 1 655 718 | 1 673 000 | 1 524 000 |
| Guinea | 722 370 | 529 200 | 542 100 | 593 000 | 530 000 |
| Canadá | 1 400 340 | 1 476 959 | 1 454 390 | 1 491 523 | 1 232 604 |
| Jamaica | 4 085 634 | 4 099 548 | 3 940 589 | 3 995 358 | 1 773 600 |
| Estados Unidos | 5 215 000 | 4 696 000 | 4 236 000 | 4 298 000 | 3 064 000 |
| Brasil | 5 191 100 | 6 735 000 | 7 077 600 | 7 822 300 | 8 625 100 |
| Surinam | 1 939 615 | 2 151 148 | 2 178 472 | 2 153 968 | 1 536 187 |
| Venezuela | 1 931 000 | 1 920 000 | 1 751 000 | 1 591 300 | 1 370 000 |
| China | 8 592 200 | 13 256 900 | 19 453 000 | 22 788 100 | 23 793 000 |
| India | 3 066 000 | 3 077 000 | 3 208 000 | 3 000 000 | 3 000 000 |
| Irán | 130 100 | 167 783 | 220 000 | 220 000 | 200 000 |
| Japón | 780 000 | 780 000 | 650 000 | 600 000 | 550 000 |
| Kazakstán | 1 505 415 | 1 514 509 | 1 544 462 | 1 607 829 | 1 706 000 |
| Australia | 17 704 000 | 18 312 000 | 18 844 000 | 19 446 000 | 19 939 000 |
| Total Mundial | 65 700 000 | 72 300 000 | 78 000 000 | 82 000 000 | 76 800 000 |

Tabla 6. Producción Mundial de Alúmina por País² (Toneladas métricas)



El proceso Bayer se puede resumir en tres etapas:

Figura 3. Proceso Bayer⁵

1) Extracción

Los minerales que contienen aluminio en forma de bauxita (gibsita, bohemita y diásporo) son selectivamente separados de los componentes insolubles del óxido mediante la disolución con una solución de hidróxido de sodio. Las propiedades químicas se enumeran a continuación:

 $\begin{aligned} Gibsita: \quad Al(OH)_3 + Na^+ + OH^- &\rightarrow Al(OH)_4^- + Na^+ \\ Bohemita y Diásporo: \quad AlO(OH) + Na^+ + OH^- + H_2O &\rightarrow Al(OH)_4^- + Na^+ \end{aligned}$

El mineral se tritura y muele para reducir el tamaño de partícula para la extracción de la alúmina. A continuación, se combina con la solución del proceso y se envía a un digestor, el cual tiene que estar a una temperatura y presión específica.

Las condiciones en el digestor se ajustan de acuerdo a las propiedades del mineral de bauxita. Los minerales con contenido alto de gibsita se procesan a los 140°C. La bohemita y el diásporo se procesan entre 200 y 240°C.

La temperatura del digestor debe controlarse estrictamente, ya que puede haber problemas de corrosión además de una posible disolución de otros óxidos en el hidróxido de sodio.

Después de la etapa de extracción, el residuo de bauxita insoluble se separa de la solución que contiene aluminio por un proceso de sedimentación. La solución se purifica a través de filtros antes de ser transportados a los precipitadores. El lodo insoluble de la sedimentación primero se espesa y se lava para recuperar el hidróxido de sodio que se devuelve de nuevo al proceso principal.

2) Precipitación

La gibsita es entonces precipitada a partir de la solución después de la digestión:

$$AL(OH)_4^- + Na^+ \rightarrow AL(OH)_3 + Na^+ + OH^-$$

Los cristales de hidróxido se clasifican en fracción de tamaño diferente y se introduce en el horno rotatorio de calcinación de lecho fluidizado. Las partículas de tamaño inferior son regresadas a la etapa de precipitación.

3) La calcinación

Los hidróxidos se calcinan para formar alúmina para el proceso de fundición de aluminio. En el proceso de calcinación, se elimina el agua para formar alúmina:

$$2Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O_3$$

El proceso de calcinación se controla cuidadosamente para garantizar la calidad de las propiedades de la alúmina obtenida. El resultado es un polvo blanco de alúmina pura. El hidróxido de sodio es devuelto al comienzo del proceso para utilizarse de nuevo⁵.

1.1.4 FUSIÓN PRIMARIA

Una vez obtenida la alúmina, esta ingresa al proceso Hall-Heroult, la cual se somete a una descomposición electrolítica, mediante el paso de corriente continua en una celda que contiene alúmina (Al₂O₃) disuelta en criolita (Na₃AlF₆) fundida. El aluminio es depositado en el cátodo, mientras el oxígeno migra al ánodo. Esta operación es llevada a cabo entre 940°C y 980°C, un gran porcentaje de la energía eléctrica es utilizado para mantener al electrolito fundido mediante efecto Joule. La pureza de la alúmina que ingresa al proceso Hall-Heroult es un factor decisivo en las propiedades del aluminio obtenido, razón por la cual se han establecido normas que definen las calidades mínimas que deben cumplir las materias primas.



Figura 4. Celda Hall-Heroult.

La alúmina se introduce en una celda de reducción a una alta temperatura (940-980°C) para disolverla en criolita. Corriente eléctrica con un bajo voltaje pero muy alta intensidad de corriente (150000 amperios) se pasa a través de la división de criolita, el oxígeno de la alúmina se vierte fuera quedando aluminio metálico. El aluminio fundido se deposita en el fondo de la celda y se desvía periódicamente.

En la fusión primaria de aluminio este se mantiene entre los 940 y 980°C, pero una vez formado tiene un punto de fusión de 660°C, es por esto que la utilización de metal reciclado en la producción de partes de aluminio representa un ahorro energético de hasta el 95% comparado con el proceso de aluminio primario. No hay diferencia entre la calidad y las propiedades del aluminio primario y el reciclado.

Dependiendo de la aplicación, el metal se procesa a través de un filtro en línea para eliminar cualquier óxido que pueda haberse formado. El metal es colado en lingotes en una variedad de métodos: moldes abiertos (típicamente para lingotes de refusión), moldes de enfriamiento directo, moldes electromagnéticos para algunos lingotes de lámina y máquinas de colada continua para bobinas de aluminio.



Figura 5. Lingotes de aluminio.

1.1.5 CLASIFICACIÓN DE ALEACIONES BASE ALUMINIO

Es conveniente dividir las aleaciones de aluminio en dos categorías principales: aleaciones de fundición y aleaciones de conformado.

El sistema para la designación del aluminio y las aleaciones de aluminio que incorporan la forma del producto (fundición, conformado o lingotes de fundición) y su correspondiente temple son asignados por la American National Standards Institute (ANSI) norma H35.1.

Sistema de designación del Aluminio y las Aleaciones de Aluminio de Conformado

Se utiliza un sistema de cuatro dígitos para identificar las aleaciones de aluminio de conformado y aluminio. Como se muestra a continuación, el primer dígito de la designación de cuatro dígitos indica el grupo:

De la serie 2xxx a la 7xxx, el grupo de aleación está determinado por el elemento de aleación presente en el mayor porcentaje. Una excepción son las aleaciones de la serie 6xxx en el que las proporciones de magnesio y silicio disponible para formar siliciuro de magnesio (Mg₂Si) son predominantes. Otra excepción se hace en aquellos casos en que la aleación califica como una modificación de una aleación previamente registrada. Si el mayor porcentaje promedio es el mismo para más de un elemento, la elección del grupo está en orden de la siguiente secuencia: cobre, manganeso, silicio, magnesio, siliciuro de magnesio, zinc, u otros.

Aluminio. En el grupo 1xxx, la serie 10xx se utiliza para designar composiciones no aleadas que tienen impurezas naturales límites. Los dos últimos de los cuatro dígitos de la designación del material indican el porcentaje mínimo de aluminio. Estos dígitos son los mismos que los dos dígitos a la derecha del punto decimal en el porcentaje mínimo de aluminio cuando se expresa con una precisión de 0,01%.

Aleaciones de aluminio. En los grupos de aleación de la serie 2xxx a la 8xxx, el segundo dígito indica una aleación modificada. Si el segundo dígito es cero, entonces la aleación es original; número enteros del 1 al 9 asignados consecutivamente, indican modificaciones de la aleación original. Las reglas explícitas se han establecido para determinar si una composición propuesta es meramente una modificación de una aleación registrada anteriormente o si es una aleación totalmente nueva. Los dos últimos de los cuatro dígitos de la serie 2xxx a la 8xxx no tienen ningún significado especial, sólo sirven para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el grupo.

Las aleaciones de conformado son aquellas que han sido fabricadas mediante un proceso en estado sólido: extrusión, trefilado, laminación, etc. Existen más de 200 de estas aleaciones, casi todas constan de al menos el 90% de aluminio, y la mayoría de más del 95%. Las aleaciones de conformado de aluminio se dividen en ocho series⁶.

| Grupo de aleación de aluminio por mayor elemento aleante | Serie |
|---|-------|
| Aluminio ≥ 99.00% | 1xxx |
| Cobre | 2xxx |
| Manganeso | Зххх |
| Silicio | 4xxx |
| Magnesio | 5xxx |
| Magnesio y silicio | бххх |
| Zinc | 7xxx |
| Otros elementos | 8xxx |
| Serie sin usar | 9xxx |

Tabla 7. Clasificación de las aleaciones de aluminio de conformado⁶

Serie 1xxx, son las aleaciones de aluminio puro, que contiene 99% o más de aluminio. El alto contenido de aluminio garantiza una alta conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, pero tienen una baja resistencia mecánica. Las aleaciones de la serie 1xxx se utilizan en aplicaciones eléctricas, para la fabricación de papel de aluminio y para la fabricación de equipo que se utiliza en la industria química. Debido a que el porcentaje mínimo de aluminio es tan alto para esta serie sólo se utiliza aluminio primario y chatarra cuidadosamente seleccionada para la fabricación de estas aleaciones. Sin embargo, la chatarra de la serie 1xxx puede ser fácilmente utilizada para la producción de aleaciones de cualquier otra serie.

Serie 2xxx, contienen de 1,0 a 6,0% de cobre, dependiendo de la aleación. Otros elementos de aleación en las aleaciones 2xxx incluyen hierro, magnesio, manganeso y silicio. Estas son algunas de las aleaciones de aluminio de alta resistencia y se caracterizan por su dureza. Son ampliamente utilizadas en la industria aeroespacial y de los ganchos. Las aleaciones 2xxx no son muy resistentes a la corrosión, y por lo tanto suelen ser pintadas o revestidas antes de su puesta en servicio. Muchas aleaciones de aluminio, a excepción de la serie 2xxx se limitan al 0,30% de cobre o menos, por lo que la chatarra de la serie 2xxx no es comúnmente utilizada para producir otro tipo de aleaciones de conformado.

Serie 3xxx, el uso de esta serie es limitado, pero son muy utilizadas. Estas aleaciones tienen hasta 1,5% de manganeso y por lo general contienen 0,7 a 0,8% de hierro. Pueden ser endurecidas por un tratamiento térmico y tienen una excelente resistencia a la corrosión. Estas aleaciones son considerablemente utilizadas en los cuerpos de las latas de aluminio para bebidas. Son también ampliamente utilizadas en utensilios de cocina, radiadores de automóviles, materiales para techos y paredes e intercambiadores de calor. La restricción del uso de la chatarra de esta serie es por el alto contenido de manganeso y hierro, que a menudo no es deseado en otras aleaciones de aluminio.

Serie 4xxx, el uso de estas aleaciones también es limitada, y estas no son tan ampliamente utilizadas como otras clases. Las aleaciones de la serie 4xxx contienen hasta un 13% de silicio, lo que mejora su resistencia al desgaste. Su uso principal es en piezas forjadas, como pistones de aeronaves, también se utilizan para las aleaciones de soldadura de aluminio. El alto contenido de silicio las hace en gran parte inservibles para el reciclaje.

Serie 5xxx, contienen hasta 5,5% de magnesio. Son especialmente conocidas por su resistencia a la corrosión y resistencia mecánica, además de que poseen una excelente soldabilidad. Por este motivo el uso de las

aleaciones de la serie 5xxx está muy extendida. Se utilizan en construcciones tan grandes como puentes, tanques de almacenamiento y artículos tan pequeños como las tapas de las latas de bebidas. También son cada vez más populares en la industria automotriz en aplicaciones estructurales, en particular, paneles de la carrocería. El magnesio es el único elemento de aleación que puede ser fácilmente refinado del aluminio fundido. Por esto, las aleaciones de la serie 5xxx son más reciclables para la producción de aleaciones de conformado que la mayoría de otras aleaciones. Sin embargo, por el alto costo del magnesio se recomienda que estas aleaciones se vuelvan a transformar en aleaciones de la serie 5xxx.

Serie 6xxx, estas aleaciones contienen hasta 1,5% de magnesio, junto con niveles de silicio de hasta 1,8%. La presencia de estos dos elementos las hace tratables térmicamente, y el bajo contenido de elementos aleantes en general las hace buenas para la extrusión. Sus usos más conocidos se encuentran en la arquitectura, pero también se utilizan en aplicaciones automotrices, aplicaciones estructurales de soldadura, y como alambre conductor de alta resistencia. Al igual que con las aleaciones de la serie 4xxx, la principal limitación para el reciclaje es el relativamente alto contenido de silicio.

Serie 7xxx, son las aleaciones de aluminio de conformado con mayores contenidos de elementos aleantes. Contienen de 1,5 a 10% de zinc, dependiendo de la aleación, contienen hasta 3% de magnesio, y algunas contienen hasta 2,6% de cobre. Las aleaciones 7xxx tratadas térmicamente tienen una mayor resistencia que las aleaciones de aluminio de conformado comunes, y unos niveles de dureza impresionante. Al igual que las aleaciones 2xxx, su baja resistencia a la corrosión induce a que sean pintadas o se les haga recubrimientos para que se pongan en servicio. Históricamente, su principal uso ha sido en la industria aeronáutica, pero también han encontrado uso en el transporte. Su contenido de zinc y cobre hace que las aleaciones de la serie 7xxx sean difíciles de reciclar en cualquier caso, excepto si se va a fabricar una aleación de la serie 7xxx o algunas aleaciones de calidad.

Serie 8xxx, se utilizan elementos de aleación que no se utiliza en las otras series. El boro, hierro, litio, níquel, estaño y vanadio son algunos de los elementos utilizados en las aleaciones 8xxx.

Sistema de designación del Aluminio y las Aleaciones de Aluminio de Fundición

Un sistema de cuatro dígitos que incorpora un punto decimal se utiliza para identificar aleaciones de aluminio y aluminio en forma de coladas y lingotes de fundición. El primer dígito indica el grupo de aleación:

Para las aleaciones 2xx.x a la 8xx.x, el grupo de aleación está determinado por el elemento de aleación presente en el mayor porcentaje, excepto en los casos en que la composición que se registra califica como una modificación de una aleación previamente registrada. Si el mayor porcentaje es común a más de un elemento de aleación, el grupo de aleación está determinado por el elemento que viene primero en la secuencia.

Los segundos dos dígitos identifican la aleación de aluminio específica o para el aluminio de la serie 1xx.x, indican la pureza. El último dígito, que está separado de los otros por un punto decimal, indica la forma del producto, ya sea de colada o lingote. Una modificación de una aleación original, o de los límites de impurezas para el aluminio sin alear, se indica mediante una letra de serie anterior a la designación numérica. Las letras se asignan en orden alfabético empezando por A, pero omitiendo I, O, Q y X, la X se reserva para las aleaciones

experimentales. Las reglas explícitas se han establecido para determinar si una composición propuesta es una modificación de una aleación existente o si se trata de una nueva aleación.

Fundiciones de aluminio y lingotes. Para el grupo 1xx.x, el segundo y tercero de los cuatro dígitos en la designación indica el porcentaje mínimo de aluminio. Estos dígitos son los mismos que los dos dígitos a la derecha del punto decimal en el porcentaje mínimo de aluminio cuando se expresa con una precisión de 0,01%. El último dígito indica la forma del producto: 1xx.0 indica fundición, y 1xx.1 indica lingote.

Fundiciones de aleación de aluminio y lingotes. Para la serie 2xx.x a la 9xx.x, el segundo y tercero de los cuatro dígitos de la designación no tienen ningún significado especial, pero sólo sirven para identificar las diferentes aleaciones en el grupo. El último dígito, que está a la derecha del punto decimal, indica la forma del producto: xxx.0 indica fundición y xxx.1 indica lingote que tiene límites para los elementos de aleación los mismos que los de la aleación en forma de piezas de fundición, excepto para los que se enumeran en la siguiente tabla.

En la actualidad hay más de 200 aleaciones de fundición, además de las aleaciones de conformado. Las aleaciones de fundición tienden a tener mayor contenido de elementos de aleación que las aleaciones de conformado. Como es el caso de las aleaciones de conformado, las aleaciones de fundición se clasifican de acuerdo a los elementos de aleación que contienen, la numeración de estas aleaciones son de 4 dígitos al igual que las aleaciones de conformado, sin embargo las aleaciones de fundición se identifican por 3 dígitos seguidos de un punto decimal y un digito final⁶.

| Grupo de aleación de aluminio por mayor elemento aleante | Serie |
|---|-------|
| Aluminio ≥ 99.00% | 1xx.x |
| Cobre | 2xx.x |
| Silicio con cobre y/o magnesio añadido | 3xx.x |
| Silicio | 4xx.x |
| Magnesio | 5xx.x |
| Zinc | 7xx.x |
| Estaño | 8xx.x |
| Otros elementos | 9xx.x |
| Serie sin usar | 6xx.x |

Tabla 8. Clasificación de las aleaciones de aluminio de fundición⁶

Serie 1xx.x, son aleaciones que son raras de encontrar en algún producto, pero tienen un contenido de aluminio del 99% o superior, similar a las aleaciones de conformado de la serie 1xxx. Generalmente se producen sólo como lingote. Su uso como productos de consumo se limita a aplicaciones que requieren alta conductividad eléctrica.

Serie 2xx.x, son aleaciones que contienen de 3,5 a 10,7% de cobre, al igual que las aleaciones de conformado de la serie 2xxx la característica de esta aleación es el cobre como elemento de aleación principal. Las aleaciones 2xx.x también pueden tener niveles significativos de hierro, magnesio, níquel, o silicio. Estas aleaciones tienen una dureza alta, sin embargo son muy susceptibles a la corrosión. Al igual que con las

aleaciones de conformado de la serie 2xxx, es necesario aplicarles un recubrimiento o pintura para evitar la corrosión.

Las aleaciones de la serie 3xx.x son los más ampliamente utilizadas de todas las aleaciones de fundición. Tienen niveles de silicio que van desde 4,5 a más del 20% y los niveles de cobre de 0,5 a 5,0%. Algunas aleaciones de la serie 3xx.x también incluyen magnesio (0,2 a 1,5%), y unas pocas contienen níquel (0,5 a 3,0%). El silicio le da a estas aleaciones una alta fluidez, reduce el agrietamiento y minimiza los rechupes en las piezas de fundición. El cobre y magnesio proporcionan endurecimiento por solución sólida. El níquel reduce el coeficiente de expansión térmica (al igual que un mayor contenido de silicio), útil en pistones y cilindros.

La serie 4xx.x contiene de 3,3 a 13% de silicio, además puede tener cobre, hierro y níquel. Su ductilidad y resistencia al impacto hacen que estas aleaciones sean útiles en aplicaciones tales como equipos de manipulación de alimentos y accesorios marinos.

Como es el caso de las aleaciones de conformado de la serie 5xxx, las especificaciones para las aleaciones de fundición de la serie 5xx.x contienen de 3,5 a 10,5% de magnesio, además puede tener niveles bajos de hierro, silicio y zinc. Junto con las series 2xx.x, 7xx.x y 8xx.x, las aleaciones de la serie 5xx.x no tienen una buena fluidez como las aleaciones que tienen contenidos altos de silicio, lo que requiere un cierto cuidado en el diseño del molde.

Las aleaciones de fundición de la serie 7xx.x contienen de 2,7 a 8,0% de zinc, al igual que las aleaciones de conformado de la serie 7xxx. El magnesio (0,5 a 2,0%) está presente en muchas de estas aleaciones, y el cromo (0,2 a 0,6%) a veces se añade también. Estas aleaciones tienen una mejor resistencia a la corrosión que las demás aleaciones de fundición y además tienen una alta resistencia al envejecimiento natural, eliminando la necesidad de tratamiento térmico.

La serie 8xx.x de las aleaciones de fundición contiene de 5,5 a 7,0% de estaño y cobre desde 0,7 hasta 4,0%, lo que les proporciona resistencia y fluidez. Estas aleaciones se utilizan para aplicaciones de rodamientos, tales como bielas y cojinetes de cigüeñal.

1.1.6 FABRICACIÓN DE PRODUCTOS

Durante el proceso de refinación de alúmina el aluminio primario se convierte en lingotes para el proceso de laminado, en tochos par el proceso de extrusión y en barras para el proceso de fabricación de alambre los cuales se transforman posteriormente en productos semi-acabados y finales.

El aluminio se clasifica según su destino de manufactura:

- A) Extrusión
- B) Laminación
- C) Fundición

Dentro del grupo A, se incluyen artículos o productos para las industrias de la construcción, transporte, electricidad, línea blanca y mobiliario, principalmente en forma de barras, perfiles y tubos.

En el grupo B, se incluyen igualmente productos para las industrias de la construcción, transporte, electricidad, línea blanca, industria litográfica y muy destacadamente, la industria del envasado de bebidas y alimentos evidentemente por tratarse de lámina y chapa de aluminio.

En el grupo C, abarca una amplia gama de productos fabricados por procesos de moldeo, ya sea en arena, inyección o molde permanente principalmente.

Extrusión de aluminio. El proceso de extrusión se hace a partir de un tocho para producir perfiles extruidos. El proceso comienza con un precalentamiento en línea que lleva la temperatura del tocho a un nivel predeterminado, dependiendo de la aleación. El tocho es entonces cortado y se deposita en una prensa hidráulica. La prensa comprime el tocho a través de una matriz de acero que da la forma deseada. Para después aplicarles recubrimientos como acabados, anodizados, pinturas y lacados.

Dependiendo de la forma y características de rendimiento deseadas de la extrusión, algunos perfiles son sometidos a un proceso de extrusión de impacto utilizando presiones considerablemente más altas para formar las partes finales.

Proceso de laminación de aluminio en caliente, puede comenzar con lingotes directos de la fundición o con rollos de la colada continua. Los lingotes se precalientan aproximadamente a 540°C y pueden ser desbastados en sus superficies onduladas o ser directamente alimentados a una laminadora de inversión en caliente. En la laminadora de inversión en caliente, el lingote pasa a través de los rodillos hacia adelante y hacia atrás, y el espesor se reduce entre 25 y 50 mm, con un aumento correspondiente en la longitud. Tras el paso por la laminadora de inversión en caliente, se alimentan a una laminadora continua caliente donde el espesor es reducido a menos de 6.3 mm.

Laminación de aluminio. El material de partida para los productos laminados son placas rectangulares de un peso de hasta 30 toneladas cada una. Estas placas se calientan a una temperatura de 525 °C y después se pasa repetidamente a través de una máquina de laminación en caliente hasta que el espesor de la placa requerida se obtiene o hasta que el metal es lo suficientemente delgado (generalmente alrededor de 3 mm de espesor), para ser enrollado y pasarse a una laminación en frío.



Figura 6. Proceso de extrusión y laminación del aluminio.

PROCESO DE FUNDICIÓN. El otro proceso que se emplea para fabricar productos de aluminio es el realizado en las fundiciones. Este es el más antiguo y más simple (en teoría, pero no en la práctica) para la fabricación de productos. Los métodos más comunes incluyen colada a presión, molde permanente y el molde en arena. Las piezas coladas son a menudo modificadas por mecanizado.

El proceso de fundición se puede dividir en dos grupos principales:

-Fundición en arena -Fundición a presión

Otras técnicas como la "espuma perdida" o los procesos de "modelos de cera" también se utilizan, pero su importancia económica es considerablemente menor que las dos técnicas anteriormente mencionadas.

FUNDICIÓN EN ARENA. La fundición en arena es el proceso más utilizado, la producción por medio de este método representa la mayor parte del tonelaje total de fundición. Casi todas las aleaciones pueden fundirse en arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con altas temperaturas de fusión, como son el acero, el níquel y el titanio. Su versatilidad permite fundir partes muy pequeñas o muy grandes y en cantidades de producción que van de una pieza a millones de éstas.

La fundición en arena consiste en vaciar el metal fundido a un molde de arena, dejarlo solidificar y romper después el molde para remover la fundición. Posteriormente la fundición pasa por un proceso de limpieza e inspección, pero en ocasiones requiere un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.

La fundición en arena no solamente incluye operaciones de fundición, sino también la fabricación de modelos y manufactura de moldes. La secuencia se muestra en la figura 7.



Figura 7. Proceso de la producción de la fundición en arena⁷

Los moldes de arena verde se hacen de una mezcla de arena, arcilla y agua, el término "verde" se refiere al hecho de que el molde contiene humedad al momento del vaciado. Los moldes de arena verde tienen suficiente resistencia en la mayoría de sus aplicaciones, así como buena refractibilidad, permeabilidad y reutilización, también son los menos costosos. Por consiguiente, son los más ampliamente usados, aunque también tienen sus desventajas. La humedad en la arena puede causar defectos en algunas fundiciones, dependiendo del metal y de la forma geométrica de la pieza.

Un molde de arena seca se fabrica con aglomerantes orgánicos en lugar de arcilla. El molde se cuece en una estufa grande a temperaturas que fluctúan entre 204°C y 316°C. El cocido en estufa refuerza el molde y

endurece la superficie de la cavidad. El molde de arena seca proporciona un mejor control dimensional en la fundición que los moldes de arena verde. Sin embargo, el molde de arena seca es más costoso y la velocidad de producción es reducida debido al tiempo de secado. Sus aplicaciones se limitan generalmente a fundiciones de tamaño medio y grande y en velocidades de producción bajas⁷.



Figura 8. Colada en un molde de arena.

FUNDICIÓN A LA ESPUMA PÉRDIDA. El procedimiento de fundición a la espuma perdida se inicia produciendo un modelo de espuma (FOAM) cuyo material de partida puede consistir en poliestireno o productos similares como el polimetilmetacrilato.

El modelo es una réplica exacta de la pieza a conseguir y se puede alcanzar de una sola vez o en varios trozos que se pegarán posteriormente. Estos modelos se fabrican en prensas similares a las de inyección de plástico donde se introduce el material de partida en forma de pequeñas bolitas en utillajes de aluminio mecanizado de gran precisión.

Mediante una aportación de vapor, agua, vacío y aire se consigue fundir, enfriar y estabilizar los modelos que una vez secos se extraen de la máquina con un aspecto superficial característico, de forma granular, resultado de la fusión de las perlitas de poliestireno. Al tratarse de modelos evaporables, son destruidos durante la colada y por tanto, cada pieza que deseemos fundir requerirá su correspondiente réplica en poliestireno. Para la formación de aquellos modelos que están constituidos por dos o más partes, previamente se ha de efectuar una operación de pegado a la salida de la prensa.

Habitualmente se utilizan métodos adhesivos en caliente y en frío o termosoldadura. Una vez formados los modelos de poliestireno el paso siguiente es formar los racimos y pintarlos. La pintura debe ser lo suficientemente refractaria como para impedir filtraciones del metal en la arena y lo suficientemente permeable como para evacuar los gases. Una vez seca la pintura se introduce el modelo en un contenedor metálico donde previamente se ha dispuesto un lecho de arena sin ningún ligante. Posado el modelo en el lecho se comienza a llenar de arena el contenedor que vibra sobre una mesa con uno o dos ejes de vibración. La vibración ayudada por la fluidez de un material sin aglomerante permite el desplazamiento de la arena por todas las cavidades del modelo alcanzando todas las zonas interiores y compactándose alrededor del modelo. De esta forma se va atacando el exterior, es decir el molde y el interior incluyendo las contra-salidas (machos) los cuales en otros procesos hubieran necesitado ser colocados previamente.

Tras la colada y el enfriamiento de la pieza el desmoldeo es sencillo; mediante una parrilla vibratoria se separa la pieza y la arena suelta con restos de pintura que lleva también incorporada algún trozo de metal. Mediante sistemas de separación mecánicos se recupera la arena que puede volver a utilizarse en un 98%.



Figura 9. Proceso de fundición a la espuma perdida.

La técnica del modelo perdido se utiliza de manera habitual en las fundiciones de pieza grande, los modelos son una reproducción exacta de las piezas a fabricar aplicando los factores de corrección de las contracciones del metal. El modelo independientemente de cómo se haya completado el molde queda totalmente embebido en él por lo que al verter la colada gasifica y se pierde. El carbono generado provoca una carburación en aleaciones de acero y hierro muy pobres en carbono y a veces pequeñas inclusiones, sin embargo presenta la ventaja de que la atmósfera carbonífera reduce la formación de escoria.

En las técnicas de moldeo con modelo perdido la realización del molde puede aplicar diferentes métodos dependiendo del material utilizado. Cuando se trata de piezas de tamaño grande se aplica material de moldeo aglutinado con sustancias químicas generalmente resinas sintéticas de curado en frío.

FUNDICIÓN A PRESIÓN. En la fundición a presión la colada se inyecta a gran velocidad en un molde permanente. Un horno de conservación del calor almacena el metal fundido. En un cilindro se dosifica la cantidad a colar y a continuación actúa el émbolo de una bomba de émbolo directamente sobre el metal fundido. La presión generada asciende a entre 70 y 140 bar, por lo que el metal se inyecta a gran velocidad en la cavidad del molde a través de un pequeño orificio llamado bebedero. Este proceso tarda por lo general entre 0,02 y 0,2 segundos. El tiempo de vaciado depende de diferentes factores (volumen de la fundición, grosor del bebedero, espesor de pared de la fundición, longitud de flujo de la colada dentro del molde). Mientras se

solidifica el material de fundición, se mantiene constante la alta presión. A continuación se suprime la presión, se abre el molde, se expulsa la fundición y se prepara el molde para la siguiente colada.

La preparación incluye principalmente la aplicación del agente de desmoldeo, así como el cierre y el precalentamiento del molde. El desmoldeante, que se aplica sobre la superficie interna del molde, mejora la movilidad de los semimoldes, impide la adherencia del metal y facilita así la rápida y cómoda separación de la fundición y el molde. Como desmoldeantes se utilizan emulsiones que contienen, entre otros, siloxanos, glicoles, parafinas y agentes tensoactivos. Antes del vaciado es necesario precalentar el molde (con quemadores de gas, equipos de rayos infrarrojos, radiadores eléctricos de cerámica), a fin de evitar tensiones térmicas y las consiguientes fisuras. Son necesarias instalaciones hidráulicas capaces de generar grandes fuerzas para mantener cerrado el molde durante la colada. El tamaño de las fundiciones depende de las fuerzas de sujeción disponibles. En la fundición a presión no se utilizan machos de arena.

La fundición a presión de cámara caliente y la fundición a presión de cámara fría, dos tecnologías aplicadas en la fundición a presión, se diferencian por la posición de la bomba de émbolo. En la fundición de cámara caliente la bomba se encuentra en posición vertical dentro del baño de metal fundido. El peligro de esta tecnología es que la colada ataque el material de la bomba. La bomba de émbolo de las máquinas de fundición a presión de cámara fría se halla fuera del horno de conservación del calor. Su posición puede ser vertical u horizontal.

Las ventajas de la fundición a presión son unas tolerancias generales bastante ajustadas, superficies lisas, contornos precisos y economía de materiales (relación de peso entre la pieza final y los materiales empleados).

La fundición a presión de cámara caliente se emplea principalmente para el vaciado de aleaciones de zinc y de magnesio. La fundición a presión de cámara fría se emplea principalmente para el vaciado de aleaciones de aluminio y, en menor medida, para aleaciones de cobre, de zinc y de magnesio.

En la actualidad se elaboran piezas fundidas bajo presión desde 1 g hasta de unos 40 kg. De peso. En algunos grupos de materiales todavía quedan márgenes de mejora como resultado de evoluciones tecnológicas.

| Grupo de | Peso de la | Medidas | | | Espesor de pared |
|------------|--------------|----------|-------|-------------|-----------------------|
| materiales | fundición Kg | Longitud | Ancho | Profundidad | mm. |
| | | mm. | mm. | mm. | |
| Aluminio | 35 | 1200 | 600 | 400 | A partir de 1,0 - 3,0 |
| Zinc | 20 | 1200 | 600 | 400 | A partir de 0,3 - 2,0 |
| Magnesio | 15 | 1200 | 600 | 400 | 1,0 - 3,0 |
| Cobre | 5 | 400 | 300 | 200 | 1,5 - 4,0 |

Tabla 9. Pesos máximos, dimensiones máximas, márgenes de los espesores de pared y aspereza de las fundiciones a presión.

En caso de que las piezas satisfagan las correspondientes exigencias (p.ej. precisión dimensional, resistencia, estructura), puede considerarse la fundición a presión en serie como una técnica rentable.

En esta técnica, el molde no se destruye en cada colada, es permanente, hecho de un metal como hierro fundido o acero. Hay varios procesos de fundición a presión, tal como se resume en la Figura 10. La fundición inyectada a alta presión es la más utilizada, lo que representa aproximadamente el 50% de toda la producción

de fundición de aleaciones ligeras. La fundición inyectada de baja presión en la actualidad representa aproximadamente el 20% de la producción y su uso va en aumento. La fundición inyectada por gravedad equivale al porcentaje restante, con la excepción de una contribución pequeña pero creciente de la fundición inyectada al vacío y los procesos de fundición a presión.



Figura 10. Clasificación de los procesos de fundición a presión.

La fundición de inyección a alta presión es un proceso de fundición en molde permanente en el cual se inyecta el metal fundido en la cavidad del molde a alta presión. Las presiones típicas son de 7 a 350 MPa. La presión se mantiene durante la solidificación; posteriormente, el molde se abre para remover la pieza. Los moldes en la operación de fundición se llaman dados. El uso de alta presión para forzar al metal dentro de la cavidad del dado es la característica más notable que distingue a este proceso de otros en la categoría de molde permanente.

Las operaciones de fundición de inyección a alta presión se llevan a cabo en máquinas especiales. Las máquinas modernas de fundición en dados están diseñadas para mantener un cierre preciso de las dos mitades del molde y mantenerlas cerradas, mientras el metal fundido permanece a presión dentro de la cavidad. La configuración general se muestra en la figura 11.



Figura 11. Configuración general de una máquina de fundición de inyección a alta presión (cámara fría).

Existen dos tipos principales de máquinas de fundición de inyección a alta presión: 1) de cámara caliente y 2) de cámara fría; sus diferencias radican en la forma en que se inyecta el metal a la cavidad.

En las máquinas de cámara caliente, el metal se funde en un recipiente adherido a la máquina y se inyecta en el dado usando un pistón de alta presión. Las presiones típicas de inyección son de (7 a 35 MPa). Son velocidades características de producción de hasta 500 partes por hora. La fundición de inyección a alta presión con cámara caliente impone una dificultad especial en el sistema de inyección, porque gran parte de dicho sistema queda sumergido en el metal fundido. Por esa causa, las aplicaciones del proceso quedan limitadas a metales de bajo punto de fusión que no atacan químicamente al pistón y a otros componentes mecánicos. Estos metales incluyen al zinc, al estaño, al plomo y algunas veces al magnesio.

Los pasos del proceso para obtener piezas por fundición de inyección a alta presión con cámara caliente son:

1) El metal fluye en la cámara con el dado cerrado y el émbolo levantado.

2) El émbolo fuerza al metal de la cámara a fluir hacia el dado, manteniendo la presión durante el enfriamiento y la solidificación.

3) Se levanta el émbolo, se abre el dado y se expulsa la parte solidificada.

4) Se obtiene la pieza terminada.



Figura 12. Ciclo de la fundición en cámara caliente

En las máquinas de fundición de inyección a alta presión con cámara fría, el metal fundido procedente de un contenedor externo para colar, se vacía en una cámara sin calentar y se usa un pistón para inyectar el metal a

alta presión en la cavidad del dado. Las presiones de inyección usadas en estas máquinas van típicamente (14 a 140 MPa). La velocidad de ciclo no es tan rápida con respecto a las máquinas de cámara caliente, debido a que es necesaria una cuchara de colada para vaciar el metal líquido desde una fuente externa en la cámara. Sin embargo, este proceso de fundición es una operación de alta producción. Las máquinas de cámara fría se usan típicamente para fundiciones de aluminio, latón y aleaciones de magnesio. Las aleaciones de bajo punto de fusión (zinc, estaño, plomo) pueden también fundirse en máquinas de cámara fría, pero las ventajas del proceso de cámara caliente favorecen más el uso de estos metales.

El proceso para obtener piezas por fundición de inyección a alta presión con cámara fría es:

1) Se vacía el metal en la cámara con el dado cerrado y el pisón retraído.

2) El pisón fuerza al metal a fluir en el dado, manteniendo la presión durante el enfriamiento y la solidificación.

3) Se retrae el pisón, se abre el dado y se expulsa la fundición.



Figura 13. Ciclo de fundición de inyección a alta presión en cámara fría.

FUNDICIÓN A BAJA PRESIÓN. En la fundición a baja presión, el metal líquido se introduce dentro de la cavidad a una presión aproximada de 0.1 MPa, aplicada desde abajo, de manera que el metal fluye hacia arriba como sé, ilustra en la figura 14. La ventaja de este método sobre el vaciado tradicional es que se introduce en el molde un metal limpio desde el centro del crisol, en lugar de un metal que ha sido expuesto al aire. Lo anterior reduce la porosidad producida por el gas y los defectos generados por la oxidación, y se mejoran las propiedades mecánicas.



Figura 14. Fundición de inyección a baja presión.

En la figura 14 el diagrama muestra cómo se usa la presión del aire para forzar el metal fundido, dentro de la cuchara de colada, hacia la cavidad molde. La presión se mantiene hasta que solidifica la pieza.

FUNDICIÓN CON MOLDE PERMANENTE POR GRAVEDAD. Este tipo de fundición es utilizado para piezas en las que la calidad de terminado y dimensional no está sujeto a restricciones de calidad, debido a que la única fuente de energía que obliga al metal a llenar la cavidad del molde es la fuerza de la gravedad, un ejemplo de la utilización de este método es la fabricación de lingotes de metal.



Figura 15. Colada de lingotes de aluminio en molde permanente por gravedad.

FUNDICIÓN CON MOLDE PERMANENTE AL VACÍO. Es una variante de la fundición a baja presión en la cual se usa vacío para introducir el metal fundido en la cavidad del molde. La configuración general del proceso es

similar a la operación de fundición a baja presión. La diferencia es que se usa la presión reducida del vacío en el molde para atraer el metal líquido a la cavidad, en lugar de forzarlo por una presión positiva de aire desde abajo. Los beneficios de la técnica al vacío, en relación con la fundición a baja presión, son que se reduce la porosidad del aire y los efectos relacionados, obteniendo una mayor resistencia del producto de fundición.

FUNDICIÓN POR COMPRESIÓN (SQUEEZE CASTING OR SQUEEZE FORMING). Como se muestra en la Figura 16, el metal líquido se introduce en un molde abierto. Una vez que todo el metal se introduce los moldes se cierran. Durante las etapas finales de cierre, el líquido se desplaza a las partes posteriores del molde. El metal líquido no requiere gran fluidez, puesto que los desplazamientos son pequeños. Por lo tanto las aleaciones de conformado, que generalmente tienen poca fluidez, pueden ser utilizadas para la fabricación de piezas por este proceso.



Figura 16. Proceso de colada de fundición por compresión.

Esta técnica es especialmente adecuada para la fabricación de piezas moldeadas reforzadas con fibras. Las fuerzas de compresión aplicadas en el aluminio líquido sirven para que este fluya a la preforma. En comparación con las aleaciones de aluminio no reforzado, las aleaciones de aluminio compuesto de matriz fabricadas por esta técnica pueden duplicar su resistencia a la fatiga a 300°C. Por lo tanto, los refuerzos se utilizan comúnmente en los bordes de la cabeza del pistón de un motor diesel donde esta propiedad se requiere que sea particularmente alta.

1.1.7 RECICLAJE DE PRODUCTOS

El elevado valor intrínseco del aluminio es un gran incentivo económico para su reciclado. De hecho, la chatarra de aluminio se puede reciclar varias veces sin pérdida de valor o propiedades. Por otra parte, la energía requerida para el reciclaje es una mera fracción de la necesaria para la producción primaria, tan sólo un 5%, aportando evidentes beneficios ecológicos.

En muchos casos, el aluminio se combina con otros materiales como el acero o el plástico, que son separados mecánicamente del aluminio antes de ser fundido en el proceso de reciclaje.

Al final de su vida útil los productos de aluminio pueden ser reciclados para darles un nuevo uso en casi todas las aplicaciones de aluminio, dado que la estructura atómica del metal no se altera durante el reciclaje. La industria de reciclaje del aluminio obtiene toda la chatarra de aluminio a partir de los productos y subproductos que han llegado al final de su vida útil. El tiempo en el cual se reciclan los productos de aluminio varía dependiendo del sector de estos. Cada sector requiere la aplicación de sus propias soluciones de reciclaje.

El producto reciclado puede convertirse en el mismo que el producto original (por ejemplo marcos de ventanas reciclados son refabricados en un marco de ventana, o latas en latas), pero a menudo se fabrica un producto completamente diferente.

Cualquier producto de aluminio puede ser reciclado infinitas veces sin perder sus propiedades. Gracias al reciclado del aluminio el material puede ser reutilizado tantas veces como sea necesario y con óptimas cualidades. El ciclo del reciclado empieza justo después de su producción ya que los recortes y restos de este proceso industrial se recuperan y reciclan directamente.

En el caso de los productos adquiridos por los consumidores el ciclo del reciclado se inicia al final de su vida útil cuando, a través de diversos canales, llega a la planta de reciclado Aquí, el primer paso es separar el aluminio de otros metales y elementos que puedan contaminarlo mediante diversos métodos (manualmente, separadores magnéticos, Separadores por Corrientes de Foucault, etc.). Una vez eliminadas todas las impurezas el aluminio, éste es prensado, embalado y enviado a fundición. Posteriormente se traslada a plantas específicas para su refabricación. Finalmente, el fundidor o refinador lo convierte en lingotes, tochos, productos de desoxidación, etc. que serán utilizados para crear nuevos productos destinados al consumo humano.

La duración del ciclo de vida varía de acuerdo a cada producto. Por ejemplo, en el caso de las latas de aluminio utilizadas para envasar bebidas, la duración es de 45 días aproximadamente, en cambio, la del aluminio utilizado en cables para el sector eléctrico es de 40 años. Sea cual sea el fin del reciclado es indudable los beneficios ambientales y económicos que supone su recuperación y reutilización.

Las fuentes de abastecimiento de la industria del aluminio son:

A) Retornos industriales como chatarra de aluminio que se genera en la planta productiva, ya sea en forma de rechazo o de sobrante de piezas defectuosas, recortes, rebabas o escorias.

B) Chatarra de aluminio proveniente del desecho de productos obsoletos o retirados de servicio, o bien de lo que se considera "post-consumo" como envases, latas, desechos de construcción o reparación, etc.

La industria de la recuperación de aluminio ocupa un lugar muy importante, pues su intervención en el proceso productivo trae como consecuencia:

- 1. No disminuir los recursos naturales no renovables.
- 2. Ahorro de agua.
- 3. Ahorro de energía en el proceso de producción.
- 4. Ahorro de aleantes.

Al incrementarse la producción de manufacturas de aluminio, se encuentra un mercado más abundante de desechos o chatarra a precios más bajos y accesibles.

Las etapas del ciclo del aluminio son las siguientes:

- 1. Extracción de la bauxita
- 2. Producción de la alúmina
- 3. Fusión primaria del aluminio
- 4. Fabricación de productos y subproductos de aluminio
- 5. Uso de los productos y subproductos
- 6. Reciclaje



Figura 17. Ciclo de vida del aluminio.

1.2 CHATARRAS DE ALUMINIO, CLASIFICACIÓN, SELECCIÓN Y TRATAMIENTO

1.2.1 PROCESO DE RECICLAJE DEL ALUMINIO

Los metales son recursos importantes y reutilizables. Aunque los metales, en contraste con los recursos como la madera, no son renovables y por lo tanto, existen en cantidad finita, los avances en la tecnología de

extracción y reciclaje han hecho posible la adquisición de grandes cantidades de recursos de la tierra al mismo tiempo aumentando la cantidad que se recicla de la fabricación y el consumo de productos metálicos.

El aluminio tiene características físicas que hacen que su reciclaje sea económicamente atractivo. Un incentivo principal del reciclaje de metales es que el proceso para producir una masa dada a partir de chatarra reciclada consume menos energía que producir la misma masa a partir de mineral virgen. Esta ventaja es particularmente magnificada con el aluminio, donde el costo energético para producir metal a partir de mineral virgen es muy alto (debido a la dificultad en la extracción química del metal puro a partir de su forma de óxido), mientras que el costo energético para producir una masa dada de aluminio a baja temperatura de fusión del aluminio). Se estima que para producir una masa dada de aluminio a partir de chatarra reciclada se requiere de sólo un 5% de la energía necesaria para producir la misma masa de aluminio partiendo de mineral virgen.

Cuando se hace referencia a la producción de metal primario, se hace alusión al metal que se produce a partir de mineral encontrado en los depósitos de la corteza terrestre. La producción secundaria indica que el material es obtenido por medio del reciclaje. El metal reciclable se puede dividir en dos tipos de chatarra: chatarra nueva y chatarra vieja.

Para obtener un producto terminado de aluminio a partir de materias primas, el aluminio se somete a una variedad de procesos de fundición, partiendo de la minería de la bauxita, refinación de la alúmina y por último la fabricación y la manufactura del aluminio metálico. Algunos de estos procesos generan subproductos de aluminio: natas y escoria durante la fusión y colada; recortes de borde y extremos de tochos durante la laminación y extrusión; torneaduras, fresados y perforaciones durante varios procesos de mecanizado; recortes durante los procesos de estampado y troquelado, así como productos defectuosos en todas las etapas de producción. A este material se le denomina "chatarra nueva", ya que se genera durante el proceso inicial y las etapas de producción del aluminio.



Figura 18. Piezas de rechazo y rebaba de aluminio, considerada chatarra nueva.

Una vez que el aluminio se convirtió en un producto final, es comprado por el consumidor y es utilizado por un tiempo determinado. La vida útil de productos de aluminio va desde unas pocas semanas para los artículos de embalaje, como latas, a décadas como los accesorios permanentes como son los marcos de ventanas y fachadas de edificios. Tarde o temprano, los productos de aluminio son desechados y encuentran su camino en el ciclo del reciclaje. Después de la recolección, este material es denominado "chatarra vieja" porque ya se ha utilizado.


Figura 19. Vida útil de los productos de aluminio, en años⁸

En general, el reciclaje de chatarra de aluminio consiste en la recolección, clasificación, trituración y/o disminución de tamaño y la fusión final en las fundidoras. Algunas chatarras están muy limpias cuando se recolectan pero otras chatarras necesitan de diversas etapas de tratamiento para ser aptas para el uso en el proceso de refusión. Este proceso se puede resumir como sigue:

• La chatarra de aluminio se recolecta por separado o mezclada y es ordenada en el patio de chatarra y luego se venden o es enviada directamente a una fundidora.

• Al llegar a la planta recicladora, los diferentes tipos de metales son separados y preparados para la trituración y reducción de tamaño. La trituración y reducción del tamaño es a menudo necesaria para una nueva etapa de separación. En primer lugar, mientras que en la trituración y el corte, la separación magnética se utiliza para eliminar el metal ferroso. Luego, utilizando varias tecnologías de separación, los metales no ferrosos son retirados de los elementos no metálicos y luego los diferentes metales no ferrosos se separan.

• Si la chatarra metálica triturada está mojada o sucia, tiene que ser secada o ser limpiada de posibles contaminantes como aceites, grasas, lubricantes, barnices, cauchos y plásticos.

En las recicladoras de aluminio, la chatarra es limpiada en caso de ser necesario, para eliminar los contaminantes que esta trae, esto se hace calentando la chatarra por debajo de su temperatura de fusión en hornos especiales y luego es cargada en el horno fusor.

Los productos típicos de aluminio reciclado incluyen piezas fundidas como cabezas de cilindro, monoblocks de motor, cajas de cambio y muchos otros componentes automotrices y de ingeniería, por un lado, y tochos de extrusión o placas de laminación para la producción de perfiles, láminas, bandas y hojas por el otro. El aluminio reciclado es muy solicitado en la industria del acero, donde es utilizado para fines de desoxidación en la fusión de acero.

Se pueden considerar diferentes tipos de chatarra:

-Cable sin centro de acero
-Perfil de prensa
-Perfil de patio
-Delgado (prensa o troquel, utensilios)
-Grueso industrial (piezas automotrices a nivel industrial)
-Grueso patio (piezas automotrices en deshuesadero)
-Bote
-Rebaba

-Revuelto

-Escorias

Por convención se consideran tres tipos generales de chatarra de aluminio:

1.- Chatarra Interna. Se generan dentro de la planta de producción y son:

-Lingotes defectuosos
-Sistemas de alimentación
-Cortes
-Material de rechazo, etc.

2.- Chatarra Nueva. Producida por el proceso de mecanizado a los productos:

-Limaduras -Rebaba -Recortes -Perforaciones

3.- Chatarra Vieja. Generada por los productos que han completado su vida útil:

-Latas de bebidas y comida
-Partes automotrices
-Perfiles de ventanas y puertas
-Cables, etc.

De la clasificación anterior se puede deducir un gran rango de composiciones de elementos aleantes, por lo que la industria del reciclado tiene que enfrentar las exigencias en especificaciones de composición química para la producción de nuevos productos útiles.

Según el Instituto Internacional del Aluminio (IAI), la relación entre la cantidad de aluminio secundario con la de aluminio primario era de un 17% en 1960, este valor se ha incrementado a un 33% en el 2006. Se espera que en el 2040, esta proporción se incremente a un 40%.



Figura 20. Consumidores de aluminio secundario⁸

1.2.2 CHATARRA NUEVA

La chatarra nueva se genera durante los procesos de fabricación iniciales. La composición de la chatarra nueva es bien conocida y, en principio, la chatarra nueva no necesita ningún proceso de pre-tratamiento antes de que sea refundida.

Incluso la chatarra nueva con pintura o recubrimientos (con la excepción de cable que es necesario un tratamiento previo antes de cargarlo al horno) no necesita ningún pre-tratamiento antes de enviarla a los hornos, ya que muchos hornos puede fundir la chatarra nueva de manera directa, y si necesita un deslacado puede realizarse en un proceso térmico inmediatamente antes de la alimentación al horno de fusión.

La variedad de tipos y formas en que se recolecta la chatarra nueva, hace que sea imposible generalizar acerca de cómo se procesa. Sin embargo, en comparación con la chatarra vieja, la chatarra nueva tiene varias ventajas que hacen que sea más fácil de reciclar:

-La chatarra nueva es conocida. En la chatarra nueva se conocen los tipos de aleaciones que la componen. Las impurezas en la chatarra como: hierro, plásticos, metales y otros también son conocidos. Esto hace que sea más fácil diseñar sistemas de procesamiento.

-La chatarra nueva es por lo general más limpia. Debido a que nunca se ha puesto en servicio, la chatarra nueva contiene menos suciedad y humedad, y está por lo general en mejores condiciones.

-La chatarra nueva no requiere de desmontaje. La chatarra nueva generalmente se obtiene de piezas de aleación y es menos probable que incluya accesorios, pinturas y otros materiales que requieren una separación física. Esto reduce los costes de procesamiento.

<image>

1.2.3 CHATARRA VIEJA

Figura 21. Patio de chatarra vieja en una fundidora.

La chatarra vieja se recolecta después del ciclo de consumo, ya sea por separado o mezclada, y está a menudo contaminada en un cierto grado, dependiendo en gran medida de su origen y sistemas de recolección. Según la industria, en la actualidad alrededor de 540 millones de toneladas de productos de aluminio están en uso y cerca de 8 millones de toneladas de chatarra vieja de aluminio se han generado en todo el mundo en el año 2004. La generación de chatarra se ha duplicado desde 1990 y se espera que aumente aún más debido principalmente al incremento continuo de contenido de aluminio en productos tales como los vehículos en los últimos 15 años y la mejora de la recopilación de materiales de embalaje, tales como latas de bebidas. Las fuentes de chatarra vieja se pueden dividir en los sectores de uso principales de aluminio: el transporte, la construcción, alambres y cables, los empaques y otros. La Tabla 10 muestra las aplicaciones típicas de las aleaciones de aluminio dentro de estos tres mercados.



Embalaje

Figura 22. Fuentes de la chatarra de aluminio⁹

Debido a la corta vida del aluminio en la industria del transporte y el embalaje, estos dos mercados representan los mayores generadores de chatarra de aluminio. Durante los próximos treinta años la tasa prevista de crecimiento anual de aluminio en las industrias de transporte y embalaje aumentará en un 3.1% y 1% respectivamente. Esto significa que la cantidad de aluminio utilizado en los automóviles de hoy en día se elevara desde 115 kg a 200 kg en 2013 (Figura 23). De acuerdo a estos números, la industria automotriz se convertirá en la mayor fuente de chatarra de aluminio.

| Sector de Mercado | Aplicación | Aleación | |
|-------------------|------------------------|------------------|--|
| | Motores | 38x, 319, 356 | |
| | Rines | A356, 5754 | |
| | Láminas de cierre | 6111, 6016, 6022 | |
| Transporte | Láminas estructurales | 5182, 5754, 2036 | |
| | Extrusión | 6082, 6061, 6063 | |
| | Parachoques | 7003, 7129 | |
| | Radiadores | 4xxx, 3003, 1x00 | |
| | Láminas pintadas | 3105 | |
| Construcción | Láminas distribuidoras | 3003, 5052 | |
| | Extrusiones | 6061 | |
| | Recipientes de bebidas | 3004, 3104, 5182 | |
| Embalaje | Contenedores rígidos | 1x00 | |
| | Envases flexibles | 8xxx | |

Tabla 10. Aplicación de aleaciones de aluminio en tres sectores del mercado¹⁰



Figura 23. Evolución del contenido de aluminio en los vehículos¹¹

CHATARRA DE ALUMINIO EN EL TRANSPORTE

El transporte es el sector más importante de la aplicación del aluminio. En 2003, aproximadamente 3.6 millones de toneladas de aleaciones de conformado y de fundición se utilizaron en los automóviles, vehículos comerciales, aviones, trenes, barcos, etc., y esta cifra va en constante aumento. En consecuencia, el sector del transporte es también una fuente principal de aluminio al final de la vida útil de un vehículo. Es extremadamente difícil precisar el tiempo de vida de un vehículo. En Alemania, por ejemplo, los automóviles se utilizan durante un período promedio de 12 años, al cabo de los cuales puede entrar en el ciclo del reciclaje. Pero su vida a menudo se extiende por la exportación a las zonas menos desarrolladas del mundo, donde su vida útil, pueden continuar por muchos años más. Del 90% al 95% del aluminio utilizado en los automóviles se recicla y es reutilizado como piezas de automóviles nuevas. Otros medios de transporte cuentan igualmente con un alto promedio de reciclaje.



Figura 24. Algunos medios de transporte en los que se utilizan aleaciones de aluminio.

El aluminio se utiliza en la industria automotriz para producir una gran variedad de piezas. La distribución de aluminio en un automóvil normal y el porcentaje de las partes de aleaciones de aluminio de fundición y conformado, se aprecian en la Tabla 11. Para los fines de reciclaje, la distinción entre la chatarra de aluminio de fundición y de conformado es muy importante, ya que generalmente solo la chatarra de aluminio de conformado puede ser reciclada en un producto de aluminio de conformado nuevo. En la actualidad, la única técnica disponible para reducir los niveles de elementos aleantes cuando se recicla chatarra de aluminio de conformado es la dilución. Una mezcla de chatarra de aluminio de fundición con chatarra de aluminio de conformado sólo puede ser reciclada en un producto de fundición de aluminio.

| Área del auto | Porción total de aluminio utilizado en el auto (%) | Aleación de aluminio de fundición (%) | Aleación de aluminio de conformado (%) |
|------------------|---|--|---|
| Partes del motor | 50 | 90 | 10 |
| Chasis | 30 | 90 | 10 |
| Carrocería | 15 | 20 | 80 |
| Equipo interior | 5 | 40 | 60 |

Tabla 11. Distribución de aluminio para fundición y para conformado en un automóvil¹⁰

La Tabla 12 muestra las aleaciones típicas utilizadas en los automóviles y su distribución de aplicación. Se puede apreciar que la aleación para fundición más ampliamente utilizada para aplicaciones automotrices es la A359 (AlSi9Cu3), aleación con una proporción de aproximadamente el 48% de todas las piezas coladas. Además, la aleación para fundición A356 (AlSi7Mg) utilizada para las ruedas y partes de los frenos representa aproximadamente el 20%. Hay que hacer notar que las aleaciones utilizadas en la industria automotriz pueden variar con la fabricación y la edad de los vehículos. Por ejemplo, casi todo el aluminio usado al principio de la construcción de vehículos era de colada.

| Tipo de Aleación | Código | Notación | Contribución (%) |
|-------------------------|--------|--------------|------------------|
| | A359 | AlSi9Cu3 | 48 |
| | A356 | AlSi7Mg | 20 |
| Aleaciones de fundición | A361 | AlSi10Mg | 12 |
| (78%) | - | AlSi12Cu | 9 |
| | A413 | AlSi12 | 7 |
| | A332 | AlSi12CuNiMg | 4 |
| | AA606 | AlMgSi0.5 | 35 |
| Aleaciones de | AA6082 | AlMgSi1 | 11 |
| conformado (22%) | AA3003 | AlMn1 | 10 |
| incluidos productos | AA5182 | AlMg4.5Mn0.4 | 9 |
| extruidos, forjados y | AA5754 | AlMg3 | 14 |
| laminados | AA6016 | AlSi1.2Mg0.4 | 15 |
| | AA7020 | AlZn5.4Mg1 | 6 |

Tabla 12. Composición de las aleaciones de aluminio en un automóvil¹²

La dificultad en el reciclaje de las aleaciones para conformado de aluminio es su baja tolerancia de elementos aleantes, que normalmente no se presentan en su composición.

La Tabla 13 proporciona un ejemplo de las diferentes aleaciones para conformado en un automóvil. Se puede observar que el contenido de zinc de la aleación AA7072 es mayor que el máximo permitido para muchas aleaciones para conformado comunes a excepción de la serie 7xxx. Sin embargo, el contenido de silicio es mayor que el permitido en la serie 7xxx.

Por todo esto, hay dos posibilidades de reciclar este tipo de aleaciones: una es que las aleación de aluminio para conformado se utilicen para producir una aleación de aluminio para fundición, ya que las aleaciones para fundición permiten un mayor porcentaje de elementos de la aleación; alternativamente, estas aleaciones para conformado pueden ser utilizadas para producir nuevas aleaciones para conformado si las impurezas se diluyen mediante la adición de aluminio primario.

| Aloggián Doco (%) | | | | Composición (% |) | |
|-------------------|----------|------|------|----------------|------|------|
| Aleacion | Peso (%) | Si | Fe | Mn | Mg | Zn |
| AA6060 | 35 | 0.45 | 0.20 | - | 0.50 | - |
| AA6082 | 11 | 1.00 | 0.30 | 0.70 | 0.90 | - |
| AA3003 | 10 | 0.50 | 0.50 | 1.30 | - | - |
| AA5182 | 9 | 0.10 | 0.20 | 0.40 | 4.50 | - |
| AA5754 | 14 | 0.30 | 0.20 | 0.40 | 3.20 | - |
| AA6016 | 15 | 1.25 | 0.30 | - | 0.50 | - |
| AA7072 | 6 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 1.20 | 4.50 |
| Total | 100 | 0.57 | 0.26 | 0.32 | 1.27 | 0.27 |

Tabla 13. Aleaciones de aluminio de conformado utilizadas en un automóvil¹²



Figura 25. Aplicaciones del aluminio en un automóvil¹¹

Una serie de procesos eficientes se utilizan para recolectar y separar el aluminio de los vehículos. La figura 26 muestra el proceso típico aplicado para reciclar un automóvil de pasajeros moderno. Algunas piezas de aluminio, tales como ruedas y cabezas de cilindro, se eliminan durante el desmontaje inicial del vehículo.

La carrocería del vehículo, incluyendo el aluminio restante, se alimenta a una trituradora en el curso del reciclaje posterior. Después de separar la fracción de hierro mediante imanes, una mezcla de plásticos, caucho, vidrio, textiles y metales no ferrosos se obtienen. Esta mezcla de varios materiales se somete a otra etapa de separación con el fin de extraer el aluminio y sus aleaciones.

Otro proceso desarrollado para clasificar la chatarra de aluminio es utilizar tecnología láser y espectroscópicos. Esta tecnología, que se encuentra ahora en una fase avanzada de desarrollo, es muy prometedora.

La chatarra de aluminio recolectada mediante los diversos procedimientos de separación es principalmente transformada en aleaciones de fundición de aluminio, que sirven como material previo para la producción de piezas fundidas. Las aplicaciones típicas incluyen motores y cajas de cambio.

Debido al aumento del uso de aleaciones de aluminio de conformado en la carrocería, el volumen de chatarra de aleaciones de conformado es cada vez mayor de, se prevé que a partir del año 2013, la selección selectiva de aleaciones de conformado de los automóviles será económicamente viable.



Figura 26. Proceso de reciclaje y desmantelamiento del aluminio, de un automóvil al final de su vida útil¹¹.

El aluminio utilizado en otros medios de transporte se recolecta por separado al final de su vida útil, cuando los vehículos comerciales, aviones, vagones de ferrocarril, barcos, etc., son desmantelados. Como las piezas de aluminio son a menudo demasiado grandes para ser directamente fundidas en el horno, primero tienen que ser reducidas a pequeños trozos por procesos tales como el cizallamiento. La vida útil de los vehículos de transporte de pasajeros puede ser considerablemente prolongada. Los remolques de silo, por ejemplo, inicialmente son reutilizados para la misma finalidad, por lo general tienen un tercio vida útil más como contenedores de almacenamiento fijos antes de estar disponible para su reciclado. La mayoría de los barcos y vagones de ferrocarril que contienen aluminio están todavía en uso, debido a la historia relativamente reciente del uso del aluminio en estos transportes y su rendimiento duradero.

CHATARRA DE ALUMINIO DE EMBALAJE

Los envases de aluminio son una gran fuente a corto plazo de chatarra. La mayoría de los productos utilizados en el envasado de alimentos tienen menos de un año de vida. El consumo actual es de cerca de 5 millones de toneladas por año. Este sector aporta cerca del 28% de aluminio reciclado, ocupando el segundo lugar después del sector del transporte. La tasa global de reciclaje de aluminio en este sector es de alrededor de 36%, principalmente de latas de bebidas, aunque la tasa varía mucho de país a país.





Figura 27. Chatarra de aluminio de embalaje.

Se pueden distinguir dos tipos de envases de aluminio:

• Envases rígidos y semirrígidos, es decir, de alimentos y latas de bebidas, latas de aerosol y platos de comida congelada que consisten principalmente de aluminio

• Envases flexibles, es decir, cuando una lámina delgada de aluminio se coloca como barrera en los envases de plásticos o de cartón, o también como empaques de aluminio los cuales pueden ser contenedores para productos como los cigarrillos, frituras, caramelos, etc.

Los envases rígidos y semirrígidos, en el que las latas de aluminio para bebidas representan el producto más importante para las recicladoras de aluminio, han desarrollado técnicas para el reciclaje de chatarra vieja en

lingotes de aluminio reciclado, de los cuales se puede fabricar productos conformados de lata. La chatarra de envases rígidos y semirrígidos tiene un alto contenido de aluminio y por lo tanto un alto valor de mercado.

En los envases flexibles, la barrera de aluminio a menudo tiene un espesor por debajo de las 6 micras. Esta es típicamente laminada en las capas de papel y/o plástico, que son los componentes más importantes de los envases. Esto significa que los residuos de envases flexibles tiene un contenido muy bajo de aluminio. Sin embargo, el aluminio laminado puede ser extraído mediante pirolisis y técnicas térmicas de plasma. Alternativamente, estos envases se incineran, pero debido a su bajo espesor, la lámina de aluminio se oxida completamente.

Latas de bebida. Las latas de aluminio para bebidas son envases cilíndricos que con mayor frecuencia tienen una porción de bebida individual y están destinados a un uso individual. Estructuralmente, se componen de tres partes: el fondo y las paredes, las cuales están fabricadas de una sola pieza y son de la aleación de aluminio 3004; la parte superior (tapa), es un círculo con perforaciones y es de una aleación de aluminio de la serie 5182 de aleación, y por último el anillo de apertura, el cual está fabricado con una aleación de aluminio 5154. La mayoría de las latas de bebidas pesan 12 onzas, pero también se hacen en muchos otros tamaños, que van desde menos de seis onzas hasta 32 onzas.

| Parte de la lata | Aleación de aluminio | Características |
|--------------------|----------------------|--|
| Fondo y paredes | 3004 | Debido a su función, está fabricada de una aleación con resistencia media. |
| Тара | 5182 | Por su diseño es necesario que esté fabricada por una aleación de buena resistencia. |
| Anillo de apertura | 5154 | Su función es la de abrir la tapa. Por ello es necesario que esté fabricado por una aleación muy resistente. |

| Tabla 14. Parte | s una lata | de bebida ¹³ |
|-----------------|------------|-------------------------|
|-----------------|------------|-------------------------|





Figura 28. Latas de bebida de aluminio.

Las latas de aluminio para bebidas ofrecen muchas ventajas. Proporcionan propiedades de barrera muy buenas, son ligeras, se abren fácilmente, enfrían rápidamente y conservar su temperatura. Las latas de aluminio para bebidas se utilizan para una amplia variedad de bebidas, incluyendo cerveza, refrescos, bebidas energéticas, y muchas bebidas no carbonatadas, como el té, bebidas de café y jugos de frutas y hortalizas. Las latas de aluminio para bebidas son altamente reciclables y forman la base del sistema de reciclaje de todos los envases de aluminio. Las UBCS son una categoría importante de la chatarra de aluminio y se vuelven a procesar para crear nuevas hojas de la aleación de la serie 3000 que son ocupadas para la fabricación de nuevas latas de bebidas de aluminio. La tapa superior y el anillo de apertura son de la aleación de la serie 5000, que contiene más magnesio que la aleación de la serie 3000. Por esta razón, se debe utilizar flúor o cloro en la en la refinación para reducir el contenido de magnesio de las latas fundidas, o alternativamente fabricar una aleación de la serie 5000 por el alto precio del magnesio.

Botellas de aluminio. Las botellas de aluminio son recipientes con cuello con forma similar a las botellas de vidrio. Se forman a partir de una sola pieza de lámina de aluminio y generalmente la tapa s de acero. Cuando se usa para las bebidas, por lo general tienen una porción de ocho a 16 onzas y están destinadas a un solo uso.

Se utilizan generalmente como una alternativa a las botellas de vidrio en los puntos de consumo donde el vidrio se considera que sea un problema de seguridad. Para los productos de cuidado personal, el aluminio se utiliza ocasionalmente en lugar de botellas de plástico para proporcionar un aspecto lujoso de la marca. Como una alternativa a las latas de bebida, las botellas de aluminio pueden estar equipadas con un cierre resellable, que es una característica que las latas de bebida de aluminio estándar no tienen. Las botellas de aluminio son considerablemente más gruesas que las latas de aluminio, posiblemente proporcionar un pequeño aumento en su capacidad para retener las temperaturas frías.

Las botellas de aluminio se utilizan con mayor frecuencia para las cervezas en entornos tales como playas, parques, conciertos, parques de atracciones y bares, donde las botellas de aluminio pueden ser preferibles a los envases de vidrio por motivos de seguridad. Con menos frecuencia, las botellas de aluminio se utilizan para los refrescos y bebidas energéticas para diferenciarse visualmente de productos de la competencia. En raras ocasiones, los productos de cuidado personal, como champú u otros artículos de tocador, pueden ser envasados en botellas de aluminio con tapas de rosca.

Las botellas de aluminio no causan problemas en las operaciones de reciclado. Por lo general son de una aleación de la serie 1000 o una aleación de la serie 3000, las cuales son muy compatibles en el proceso de reciclado, específicamente son utilizadas para fabricar láminas de aluminio que a su vez son empleadas en la elaboración de nuevas latas de bebida de la serie 3000. Las aleaciones de la serie 1000 contienen la menor cantidad de elementos aleantes y por lo tanto no hay elementos que deban ser eliminados durante la refinación metalúrgica de la fundición.



Figura 29. Botellas de aluminio para bebidas.

Recipientes rígidos. Un recipiente de aluminio rígido consta de una bandeja con paredes verticales y una tapa desmontable. Para aplicaciones en alimentos, la tapa puede ser de estilo desplegable, en cuyo caso se tendrá un anillo de apertura unido que perforara un borde de la tapa para iniciar su remoción. Alternativamente, la tapa puede incluir un dispositivo que se utiliza en lugar de un anillo de apertura. Para otras aplicaciones, en el recipiente se puede administrar una tapa de rosca o simplemente una tapa equipada.

Muchos recipientes de aluminio rígidos se utilizan en los alimentos perecederos sin refrigeración, lo cual es un beneficio atractivo en cualquier entorno donde la refrigeración puede no ser accesible.

Los recipientes rígidos de aluminio son los más utilizados para contener alimentos como peces, por ejemplo las anchoas, atún y las sardinas, y las carnes procesadas como el jamón, y como tal, por lo general se venden en los supermercados y grandes tiendas de conveniencia. Otros usos no alimentarios para los envases rígidos de aluminio son variados e incluyen cosméticos y cigarros.



Figura 30. Recipientes rígidos de aluminio para alimentos.

Los recipientes rígidos de aluminio son totalmente compatibles con el sistema de reciclado de envases de aluminio. Son fabricados comúnmente de una aleación de la serie 3000 o de serie 5000, las cuales imparten tanto la rigidez como la resistencia necesaria al recipiente. El proceso de eliminar el exceso de magnesio de la serie 5000 para obtener una aleación de la serie 3000 es una parte integral de la operación de reprocesamiento.

Tubos de empaquetado comprimibles. Los tubos de empaquetado de apriete de aluminio son flexibles, son tubos cilíndricos y cónicos en un extremo. Pueden estar fabricados en su totalidad de aluminio o pueden tener una estructura compuesta que implica una lámina rodeada por una capa de plástico. Los tubos están fabricados a partir de lingotes de aluminio por un proceso de extrusión de impacto. Por lo general, cuentan con una tapa superior desmontable de plástico o un tapón de rosca de aluminio o de plástico rígido.

El aluminio se utiliza para la construcción de tubos de empaquetado de apriete debido a su combinación de protección y flexibilidad. En comparación con la mayoría de otros materiales, el aluminio tiene características superiores al apretarse, que le dan la capacidad de permanecer doblado sin romperse. Esta característica es necesaria en un contenedor que está diseñado para ser apretado y doblado como método de dispensación.

Los tubos de empaquetado de apriete se utilizan para muchas pastas y líquidos espesos donde se desea un sistema de dispensación controlable. Todos los tubos de empaquetado de apriete de aluminio se usan más comúnmente para materiales de arte, como pinturas, y otros artículos destinados a uso doméstico, tales como

adhesivos, pegamentos y otros productos que no pueden ser expuestos al oxígeno. Con menos frecuencia, los tubos de empaquetado de apriete de aluminio se utilizan en los alimentos como la pasta de tomate y la pasta glaseada, en productos de cuidado personal, tales como las pastas de dientes o tintes para el cabello, y productos farmacéuticos como cremas y geles.





Figura 31. Tubos de empaquetado de apriete

Tubos de empaquetado de apriete de aluminio no son problemáticos en el proceso de reciclaje de aluminio. Son fabricados a partir de una aleación de la serie 1000, la cual, debido a su elevada pureza, permite que el tubo pueda flexionarse y además imparte una textura suave. Por un lado la aleación de la serie 1000 es totalmente compatible con la operación de reprocesamiento de aluminio, sin embargo las secciones extremas delgadas de un tubo de empaquetado de apriete de aluminio se oxidan muy rápidamente en un horno y se pierde en lugar de fundirse. Sin embargo, las secciones más gruesas cercanas a la abertura del tubo se oxidan más lentamente lo que contribuye a la recuperación de una mayor cantidad de aluminio. Si un tubo de empaquetado de apriete de aluminio tiene una tapa de plástico, esta debe de ser retirada antes de que el tubo se funda, porque el plástico generara una reacción exotérmica en el interior del horno, provocando un aumento en la temperatura del aluminio líquido.

Las latas de aerosol. Las latas de aerosol se utilizan para contener y dispensar una gran variedad de diferentes líquidos, cremas, y gases. Aunque las latas de aerosol son comúnmente de acero, aproximadamente el 10% son de aluminio. Las latas de aluminio de aerosol se fabrican mediante un proceso de extrusión de impacto para crear el cuerpo a partir de un solo lingote de aluminio. A la parte superior del recipiente se le da una abertura de boca ancha para que se adhiera la válvula del aerosol. La válvula del aerosol es una pieza de material compuesto que tiene partes de plástico y metal, y su función es regular, dirigir, y distribuir el contenido. Con el fin de forzar el contenido de la válvula del aerosol, las latas de aerosol están presurizadas con un propulsor. Hay dos clasificaciones generales de propulsores: hidrocarburos basados en propulsores tales como propano y gases comprimidos tales como dióxido de carbono. El producto puede estar separado del propulsor mediante una bolsa interior la cual contiene el producto, o mediante la colocación de un pistón entre el producto líquido y el propulsor gaseoso.

Las latas de aerosol tienen la capacidad única para dispensar un producto líquido en un rocío fino, que es útil para los productos que deben ser distribuidos en una capa fina. Además son envases que son capaces de contener y administrar los gases de una manera regulada. Las latas de aerosol se utilizan en una amplia variedad de productos. Su uso más frecuente es para productos de cuidado personal, tales como cremas de afeitar, aerosoles para el cabello y desodorantes. Otras aplicaciones menos frecuentes son desodorantes ambientales, limpiadores, protectores solares, insecticidas y pinturas. Las latas de aerosol también se utilizan para contener y distribuir los gases, con mayor frecuencia como un "limpiador de aire" o "aire comprimido", que es un nombre equivocado, porque los gases inertes como el difluoroetano se utilizan a menudo en lugar de aire comprimido.



Figura 32. Latas de aerosol de aluminio

Las latas de aerosol son compatibles con el proceso de reciclaje de aluminio, aunque no se incluyen con frecuencia en el proceso del reciclaje, por cuestiones de seguridad. Cuando los materiales reciclables de aluminio se compactan y se empacan, una lata de aerosol pueden romperse y permitir que el propulsor escape y se expanda rápidamente. Si se utiliza un propulsor a base de hidrocarburos, puede incendiarse durante este proceso. Por estas razones, algunos programas de reciclaje prohíben las latas de aerosol en los sistemas de recolección e indican quitar cualquier lata de aerosol que sea recolectada por equivocación. Además un aerosol presurizado puede crear una bola de fuego cuando se añade al horno. Debido a que la mayoría de las latas de aerosol de aluminio se utilizan para productos de cuidado personal destinados a un uso cerca de la cara de una persona, por lo general no contienen propulsores inflamables a base de hidrocarburos. La mayoría de las latas de aerosol se fabrican a partir de una aleación de la serie 1000 y pueden ser usadas en la producción de aleaciones de la serie 3000. Sin embargo, es muy importante que la válvula y la tapa se quite de la lata de aerosol, ya que normalmente contienen componentes de plástico y acero que son muy problemáticos en la fusión de las latas.

Tapas de rosca de aluminio. Las tapas de rosca de aluminio son pequeños tapones roscados utilizados para sellar las botellas, y poder volverlas a sellar. Son fabricadas de un lingote de aluminio por un proceso de extrusión de impacto. Generalmente se fabrican de una aleación de la serie 5000, la cual incluye al magnesio para proporcionar resistencia.

Las tapas de rosca de aluminio pueden volver a cerrarse, lo que los hace una alternativa atractiva en comparación con las tapas normales. Las tapas de rosca se utilizan a menudo en los envases de aluminio, ya que pueden ser fabricadas junto con el contenedor en una misma instalación. En las botellas de vino de vidrio, las tapas de rosca de aluminio se utilizan como una alternativa a los tapones de corcho, ofreciendo la ventaja

de no requerir un sacacorchos para abrir. En otras botellas de vidrio, pueden ser utilizadas para proporcionar un cierre más atractivo en comparación con una tapa de plástico de rosca equivalente.

Las tapas de rosca de aluminio se utilizan en algunos tubos de empaquetado de apriete, botellas de aluminio, botellas de vino y otras múltiples botellas de vidrio como las utilizadas para contener bebidas alcohólicas.



Figura 33. Tapas de rosca de aluminio en botellas de vidrio.

Las tapas de rosca de aluminio son viables para utilizar en el proceso de reciclaje del aluminio. La aleación de la serie 5000 de la cual se fabrican es muy similar a la aleación utilizada en los anillos de apertura de las latas de bebida de aluminio, por lo que son fácilmente utilizadas en el reciclaje. Sin embargo, debido a su pequeño tamaño, las tapas de rosca se pueden perder en la mezcla de los materiales reciclables de aluminio y pueden no llegar al proceso de fusión.

Bandejas de aluminio. Las bandejas de aluminio son estructuras semi-rígidas que están hechos de una lámina de aluminio por un proceso de extrusión de impacto. Se utiliza generalmente para productos alimenticios por su capacidad para retener y reflejar el calor. La propiedad del aluminio como barrera protectora es también una cualidad atractiva para la contención de los alimentos, aunque las bandejas de aluminio son raramente diseñadas para tener un cierre hermético.

Las bandejas de aluminio se fabrican a menudo para el uso doméstico (por ejemplo, las cacerolas de pastel), pero en aplicaciones de envasado su uso principal es para la comida rápida. Las bandejas redondas que están diseñadas para engarzar en una tapa de papel se usan comúnmente en la industria de la restauración. También se utilizan como recipientes desechables que sirven también de servicio de platos o productos alimenticios tales como tortas.





Figura 34. Bandejas de aluminio para alimentos.

Debido a que las bandejas de aluminio se hacen generalmente de una aleación de la serie 1000 o de la serie 3000, son fácilmente utilizables en el proceso de reciclaje del aluminio. Sin embargo, debido a que son bastante planas son susceptibles a aplanarse por completo durante el proceso de recolección, a menudo son erróneamente clasificadas con productos de papel. También, dependiendo del grosor de la bandeja, una bandeja de aluminio puede oxidarse demasiado rápido como para contribuir a un porcentaje considerable durante la fusión del aluminio reciclado. Por otra parte, las bandejas de aluminio pueden ser rechazadas en los procesos de reciclaje debido a los alimentos y residuos de aceite que pueden estar presentes.

Papel de aluminio. El papel de aluminio se define simplemente como cualquier hoja de aluminio que tiene menos de dos milímetros de espesor. El papel de aluminio para el empaquetado se realiza con una aleación de la serie 1000 por su suavidad y flexibilidad. El papel de aluminio tiene excelentes propiedades de compactación lo que significa que es capaz de conservar su forma una vez que se dobla.

Se utiliza generalmente por su bajo peso, su capacidad de adaptarse a formas complejas, sus propiedades de compactación y sus cualidades protectoras. Incluso una lámina de aluminio muy delgada proporciona una barrera casi completa contra el aire y la humedad. El papel de aluminio también se utiliza frecuentemente por sus propiedades decorativas, aprovechando su atractivo de reflectividad.

El papel de aluminio se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones de empaquetamiento, incluyendo envolturas de confitería, de goma de mascar y empaquetamiento de cigarrillos. La mayoría, pero no todos, los alimentos son químicamente compatibles con estar en contacto directo con papel de aluminio. El papel de aluminio se utiliza en la cocina, en las parrillas, en recalentamiento o para envolver los alimentos.

Se fabrica a partir de la aleación de la serie 1000, lo que lo hace un buen material para el reciclado, sin embargo una lámina de aluminio es demasiado delgada para fundirse en un horno lo que provoca que se oxide muy rápidamente. Debido a esto, algunos recicladores no compran pacas de aluminio que contienen cantidades apreciables de papel de aluminio. En consecuencia, el papel de aluminio no se recolecta a menudo en programas de reciclaje. Además, como se mencionó el papel de aluminio se pone comúnmente en contacto con alimentos, por lo cual es normal que tenga residuos de comida y aceites¹⁴.



Figura 35. Papel de aluminio.

CHATARRA DE ALUMINIO EN LA EDIFICACIÓN Y LA CONSTRUCCIÓN

En 1893, la famosa estatua de Eros alado fue erigida en el Piccadilly Circus de Londres. En 1898, la cúpula de la Iglesia de San Joaquín, en Roma, fue revestida con hojas de aluminio, las cuales aún se encuentran en perfectas condiciones hoy en día, después de más de 100 años. El Empire State en New York, inspirado en Art-Deco, fue el primer edificio en utilizar componentes de aluminio anodizado en 1931. Más recientemente, el aluminio se utilizó en la construcción de la Louvre Pyramide, en Paris (1989) y en las fachadas del Parlamento Europeo en Bruselas (1995), que contiene alrededor de 1000 toneladas de aluminio.



Figura 36. Primeros usos del aluminio en la edificación y la construcción hasta el día de hoy¹⁵

Actualmente el aluminio es utilizado en una gran cantidad de aplicaciones en la construcción, y es el material preferido para muros cortinas, marcos de ventanas, y otras estructuras de cristal. Se utiliza también para persianas enrollables, puertas, cerramientos exteriores y cubiertas, falsos techos, paneles de pared y divisiones, equipos de calefacción y ventilación, protecciones solares, reflectores de luz y edificios

prefabricados. Las estructuras de alta mar, plataformas de aterrizaje, barandillas, andamios, o escaleras de mano, también suelen realizarse en aluminio.



Figura 37. Algunas aplicaciones actuales del aluminio en la edificación y construcción¹⁶

El aluminio se utiliza en la edificación y construcción, por diversas razones:

Flexibilidad de diseño: El proceso de extrusión ofrece una gama casi infinita de formas y secciones, permitiendo a los diseñadores integrar numerosas funciones en un solo perfil. Chapas para revestimiento y paneles compuestos de aluminio, pueden ser fabricados planos, curvos, acanalados o intercalados con otros materiales.

Vida útil: Los productos de aluminio para la construcción están realizados en aleaciones que son resistentes al agua, a la corrosión e inmunes a los efectos dañinos de los rayos UVA, garantizando un rendimiento óptimo durante un largo periodo de tiempo.

Poco mantenimiento: Aparte de la limpieza por razones estéticas, el aluminio no requiere de ningún mantenimiento específico, lo que se traduce en un ahorro de costes importante, y en una ventaja ecológica durante la vida útil del producto.

Acabados superficiales: El aluminio puede ser anodizado o pintado en cualquier color y efecto óptico, utilizando diferentes acabados superficiales, con el fin de satisfacer las necesidades decorativas de cualquier diseñador. El anodizado y lacado, sirven también para aportar mayor durabilidad al material y aumentar su resistencia a la corrosión, así como para proporcionar mayor facilidad para su limpieza.



Figura 38. Diferentes acabados superficiales en perfiles de aluminio.

Relación alta resistencia-Bajo peso específico: Esta propiedad única permite cumplir con las especificaciones de rendimiento requeridas, reduciendo al mínimo la carga muerta sobre la estructura del edificio. Una ventaja clave en las aplicaciones de revestimiento y techado.

Alto poder reflector: Debido a esta propiedad, el aluminio es muy adecuado para la industria de la iluminación. Colectores solares de aluminio y reflectores de luz pueden ser instalados para reducir el consumo energético de iluminación, así como la calefacción en invierno. También se pueden fabricar protecciones solares de aluminio que reducen la necesidad de aire acondicionado en verano.



Figura 39. Propiedad de reflectividad del aluminio¹⁶

Conductividad térmica: El aluminio es un buen conductor del calor, por lo que resulta un material excelente para intercambiadores de calor de sistemas de ventilación, o de colectores solares térmicos. Si bien esta propiedad puede ser una desventaja en carpinterías de ventanas o fachadas, con un diseño apropiado y con la utilización de perfiles de rotura térmica, la conductividad térmica pasa a ser baja.

Principalmente se utilizan aleaciones de la serie 1xxx, 3xxx y 5xxx para la fabricación de productos laminados y la serie 6xxx para productos extruidos.

Los productos laminados de aluminio se obtienen a través del proceso de laminación, mediante el cual grandes planchas de aluminio se introducen en los laminadores y se convierten en láminas de diferentes espesores. Principalmente se utilizan aleaciones de la serie 1xxx, 3xxx y 5xxx para la fabricación de productos laminados. El proceso suele comenzar con un método de laminación en caliente, sosteniendo el bloque de un lado a otro a través de un rodillo. La reducción del material final se realiza a través de un proceso de laminado en frío, y la hoja se puede reducir a un espesor de 0,15 mm. La hoja puede ser aún más reducida, llegando a papel de aluminio con un espesor de 0.007 mm. Las hojas pueden usarse, por ejemplo, como revestimiento de paneles o persianas, mientras que las láminas se suelen aplicar a otros materiales¹⁶.



Figura 40. Proceso de laminación del aluminio y uso de las láminas de aluminio

Los perfiles de aluminio se obtienen a través del proceso de extrusión que consiste en pulsar un tocho cilíndrico caliente de aluminio a través de una forma dada. La facilidad con que las aleaciones de aluminio pueden ser extruidas en formas complejas permite que el diseñador realice con el metal exactamente lo que necesita, y también que introduzca características multifuncionales. Se utilizan aleaciones de 6xxx para productos extruidos. Los productos extruidos de aluminio se utilizan en edificios comerciales y domésticos para ventanas, puertas, muros cortinas, estructuras de casas prefabricadas, y en muchas otras aplicaciones.



Figura 41. Proceso de extrusión del aluminio y uso de los perfiles

El reciclaje del aluminio utilizado en la edificación y construcción es posible ya que se utilizan aleaciones de la serie 1xxx, 3xxx, 5xxx y 6xxx. En muchos casos, el aluminio se combina con otros materiales como el acero o el plástico, que son separados mecánicamente del aluminio antes de ser fundido en el proceso de reciclaje. La trituración seguida por corrientes de Foucault y separación de inmersión y flotación.

El aluminio puede ser fundido, ya sea por refundidores o refinerías

• Los refundidores, principalmente, procesan las aleaciones para conformado de desecho en hornos de solera seca para producir lingotes de extrusión o planchas de rodadura.

• Las refinerías derriten todo tipo de desechos, incluidas las aleaciones mixtas y sucias en hornos rotatorios, que funden y refinan la chatarra de aluminio con una capa de sal. Las refinerías producen principalmente aleaciones para fundición.

Como consecuencia de la evolución tecnológica cada vez más refundidores son capaces de procesar productos conteniendo pintura u otros polímeros sin labores adicionales de relevancia. Utilizan hornos de dos cámaras. Los acabados de aluminio (recubrimiento, por ejemplo) se queman en la primera cámara, y las emisiones de gas se recogen en equipos de recirculación eficientes. El calentamiento de aluminio tiene lugar principalmente en la segunda cámara.

A continuación se ilustra cómo se reciclan los productos de aluminio de edificación y construcción hoy en día.



Figura 42. Proceso de reciclaje de productos extruidos de aluminio.



Figura 43. Proceso de reciclaje de productos laminados de aluminio¹⁶

1.2.4 PRE-TRATAMIENTO DE LA CHATARRA

La mayoría de la chatarra reciclada es chatarra vieja, esto conlleva a que tenga grasas, aceites, elementos orgánicos, pinturas, residuos de cosméticos y alimentos, etc., es necesario realizarle una serie de pretratamientos antes de que se funda para tener un mejor rendimiento en la fusión.

DECAPADO. Es el proceso por el cual se elimina la pintura, tinta, papel, plásticos y aceites de la superficie de la chatarra de aluminio, aunque el proceso de decapado puede aplicarse con éxito para la chatarra de cobre y acero.

Los productos de aluminio vienen a menudo recubiertos con un material orgánico de algún tipo. Una gran variedad de lacas y polímeros se utilizan para recubrir los productos de aluminio extruidos, los más representativos son las latas, extrusiones, material litográfico, láminas, viruta, limadura y papel de aluminio. Los productos de las aleaciones de la serie 2xxx y 7xxx generalmente son pintados, las rebabas y perforaciones de las operaciones de mecanizado traen consigo importantes niveles de grasa y aceite. En la tabla 15 se enumeran los recubrimientos de los diferentes productos de aluminio y los porcentajes en peso del material orgánico.

| Tipo de Chatarra | Recubrimiento | Peso Recubrimiento (%) | |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------|--|
| Aerosol | Lacas, pinturas | 2-3 | |
| Papel transformado | Tintas, lacas | 7 | |
| Envases flexibles | Varios | <85 | |
| Bandas epóxicas | Aceites, pinturas, polímeros | 6 | |
| Lámina litográfica nueva | Resina fenólica, papel | <4 | |
| Papel aluminio | Aceites | <10 | |
| Papel laminado | Papel, tintas | 50-60 | |
| Tubo laminado | Polímeros lacas | 70 | |
| Virutas | Aceites de cortes | <20 | |
| Latas de bebidas | Lacas, pinturas | 2-3 | |
| Lámina litográfica usada | Resina fenólica, tintas | 2 | |
| Marcos de ventanas | Termolacados, resinas | 21 | |

Tabla 15. Tipos de chatarras de aluminio y sus recubrimientos

Hasta la década de 1980 típicamente se cargaba el material recubierto o aceitoso directamente en el horno fusor junto con el resto de la chatarra. Esto generaba varios efectos nocivos.

El material orgánico se quema al ser cargado en el horno. El humo generado y el hollín son un peligro para la salud además de ser difíciles de eliminar en la planta recolectora de gases.

El recubrimiento quemado calienta el metal del fondo del baño líquido, provocando que este también se oxide. La Figura 44 muestra la pérdida de metal fundido de diversos tipos de chatarra recubiertos y sin recubrimiento cargados directamente a un horno. Se puede observar que la chatarra pintada o recubierta se oxida más que la chatarra limpia, independientemente del tipo de aleación. Usando fundente en la fusión ayuda un poco, pero las pérdidas de metal están aún por arriba del 5%. Además de hollín y humo, otras emisiones toxicas por la combustión del revestimiento son las dioxinas y los furanos. Las dioxinas y los furanos son más propensos a formarse cuando la temperatura se eleva y se consideran especialmente peligrosos, incluso en cantidades mínimas.

Debido a esto, la chatarra recubierta o aceitosa se convirtió en el material no deseado en algunas fundidoras. Las latas de bebidas eran especialmente impopulares, ya que eran difíciles de sumergir en el metal fundido y además generaban una gran de pérdida de metal fundido. Sin embargo, la creciente popularidad de latas de aluminio, el desarrollo de instalaciones especializadas para reciclarlas y el fomento en la investigación de la búsqueda de mejores formas de quitar el aceite y los recubrimientos de las superficies de chatarra aumento su reciclaje.



Figura 44. Efecto del tipo de aleación, recubrimiento y uso de fundente con respecto a la pérdida de metal.

Un proceso de decapado tiene varios objetivos:

-La eliminación completa de la materia orgánica de la superficie de la chatarra.

-Minimizar la oxidación de la superficie de la chatarra.

-Disminuir las emisiones de subproductos nocivos, tales como VOCs (compuestos orgánicos volátiles, por sus siglas en ingles), las dioxinas y furanos y el NO_x (óxidos de nitrógeno).

-El uso del poder calorífico de la materia orgánica para que el proceso sea autotérmico, capaz de abastecer sus propias necesidades energéticas.

-El costo mínimo de capital y de operación.

La tabla 16 muestra el tiempo de vida de los recubrimientos a diferentes temperaturas, con una atmosfera de Ar, Ar + 1% de O_2 y aire. Las temperaturas más altas tienen un efecto evidente.

| Temperatura de | | Atmosfera | |
|----------------|--------|------------------------|--------|
| Decapado (°C) | Ar | Ar + 1% O ₂ | Aire |
| 400 | 21 s | 13 s | 7 s |
| 500 | 0.4 s | 0.2 s | 0.2 s |
| 600 | 0.02 s | 0.01 s | 0.01 s |

Tabla 16. Tiempo de vida de los recubrimientos bajo condiciones variables.

Sin embargo, el decapado a altas temperaturas aumenta el consumo de energía, lo que hace más difícil de operar el proceso autotérmicamente. También aumenta la oxidación superficial del metal durante el proceso de combustión del recubrimiento, lo que se traduce en una mayor pérdida de metal fundido.

Es por esto, que dos técnicas básicas han surgido en el proceso de decapado térmico de chatarra de aluminio. La primera de estas, es la exposición prolongada de la chatarra a una temperatura más baja (480 a 520°C), lo que minimiza la oxidación del metal. Sin embargo, esto también puede resultar en un decapado incompleto. La segunda, es calentar rápidamente la chatarra a una temperatura justo por debajo del punto de fusión (590 a 620°C), con una exposición muy breve. La limitación de esta técnica es la potencial oxidación excesiva del metal si la exposición a la temperatura es demasiado larga.

PIROLISIS. Parte del aluminio utilizado en los envases está fabricado a partir de una lámina, en lugar de haber sido fabricado por extrusión como comúnmente ocurre. El papel de aluminio se utiliza en una gran variedad de paquetes, típicamente anexado al papel o plástico. El porcentaje de aluminio en estos paquetes es bajo, y la lámina delgada de aluminio se oxida fácilmente, por lo que el reciclaje de este material con pérdidas mínimas de aluminio es difícil.

Los hornos utilizados para la pirolisis de la chatarra de embalaje son similares a los utilizados para el decapado. Los hornos rotatorios, de banda, y de lecho fluidizado han sido probados para la pirolisis. Sin embargo, hay diferencias en la práctica operativa con respecto al decapado. El contenido orgánico en la chatarra de embalaje es mucho mayor que en la chatarra recubierta con pinturas o barnices, por lo que el volumen de compuestos orgánicos volátiles generados es mayor por unidad de aluminio recuperado. Además, los plásticos encontrados (en particular, el polietileno, más conocido como PET) generan mucho más hollín cuando son pirolizados en comparación con los que generan las lacas en las latas de aluminio. Debido a que las aleaciones de aluminio utilizadas para la fabricación de láminas tienen mucho menor contenido de aleantes que las utilizadas en otras aplicaciones, los hornos para la pirolisis pueden funcionar a temperaturas más altas sin la preocupación de que se funda el aluminio. Sin embargo, las láminas son delgadas (de 7 a 9 micras), por lo que una capa de óxido sobre la superficie es una fracción de peso mucho más grande de la chatarra que para los otros productos de aluminio. Utilizar una baja temperatura en una pirolisis es lo más recomendable.

REMOCIÓN DE PINTURA. El decapado y la pirolisis son eficaces para remover de la chatarra de aluminio los recubrimientos orgánicos y los contaminantes. Sin embargo, la chatarra de aluminio es pintada comúnmente, y la remoción de la pintura es más difícil. El componente orgánico de la pintura puede ser volatilizado, pero la pintura contiene a menudo compuestos inorgánicos (en particular, TiO₂) que no se remueven con el decapado y la pirolisis. Los compuestos inorgánicos permanecen en la chatarra y terminan en la escoria cuando se funde. Esto aumenta la pérdida de metal líquido y aumenta la cantidad de escoria que debe ser manejada. Además, el TiO₂ puede ser reducido por el aluminio fundido:

Hasta cierto punto, la pintura puede ser eliminada por abrasión durante el proceso de decapado. La acción giratoria durante el funcionamiento del horno rotatorio elimina parte de la pintura. La abrasión provocada por el medio de fluidización durante la remoción de revestimientos es aún más eficaz. La investigación ha demostrado que un ácido halogenado en solución con ácido acético fórmico hace que la pintura se hinche y se libere de la lata, por lo que es más fácil de quitar.

EXUDADO EN LA FUSIÓN. La mayoría de la chatarra de aluminio puede ser separada de otros metales a los cuales está unida mediante la trituración, sin embargo hay excepciones. Algunas piezas de aluminio están tan estrechamente unidas a las piezas de hierro que no pueden ser separadas por una trituración ordinaria. Algunos ejemplos de esto son las transmisiones, cabezas de cilindros y los múltiples. Estos elementos son conocidos como chatarra de alto hierro debido a los niveles extremadamente elevados de hierro (50% o más). La chatarra de este tipo tiene demasiado aluminio para ser clasificada como chatarra ferrosa, pero también tiene demasiado hierro para refundirse directamente con la chatarra de aluminio.

Una solución a este problema es la utilización de hornos de exudado. Estos tipos de hornos pueden ser del tipo giratorio o tener un diseño menos sofisticado como un simple horno de reverbero. En cualquier caso el principio es el mismo. La chatarra con alto contenido de hierro es alimentada al horno, se calienta a una temperatura justo por encima del punto de fusión del aluminio (660°C). A esta temperatura, el aluminio se derrite lentamente (de ahí el término exudado) fluyendo a una sección del horno, dejando al hierro de mayor punto de fusión atrás.

El aluminio líquido se drena desde el fondo del horno y adquiere forma de cerdas. Los hornos pueden calentarse con una variedad de combustibles y también se utilizan para la fundición de zinc separando el aluminio sólido en la chatarra de radiadores a temperaturas más bajas. Los hornos rotatorios son más eficientes para separar el aluminio de las piezas de hierro, y por lo tanto se obtienen cerdas con un menor contenido de hierro¹⁷.



Figura 45. Horno de exudado rotatorio.

1.2.5 MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE LA CHATARRA

Aunque el aluminio se recicla en grandes cantidades, la contaminación por los elementos aleantes es un problema en el reciclaje de productos de aluminio al final de su vida útil, lo que causa problemas al momento de su refusión, por lo tanto es necesario clasificarla.

La figura 46 muestra las distintas clases de aleaciones que se utilizan para fabricar numerosos productos, esta diversidad de aleaciones obliga a separarlas de acuerdo a sus elementos aleantes comunes. La mayor parte de aluminio se utiliza en forma de aleaciones y no como metal puro, Cu, Fe, Mn, Mg, Si, y Zn se añaden habitualmente al aluminio para impartirle las propiedades requeridas. El aluminio casi puro, clasificado como serie 1xxx, se utiliza principalmente para la producción de materiales de aluminio, y su proporción de la producción total de aluminio es pequeña. La figura 47 muestra la composición química de las diferentes aleaciones de aluminio especificadas por las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). Las aleaciones de la serie ASTM 6000 son típicas de las aleaciones de aluminio industrial. Las propiedades químicas y mecánicas que son necesarias para los usos de los productos se pueden lograr mediante la adición principalmente de Mg, Si, Fe y Cu en el aluminio. Las aleaciones de la serie ASTM 1000 contienen aluminio con un grado de pureza superior al 99,9% y se producen principalmente a partir de aluminio virgen, que a su vez es producido por fundición electrolítica. Por el contrario, la mayoría de los productos de fundición y fundición a presión, contienen importantes cantidades de elementos aleantes. Por ejemplo, la concentración total de elementos de aleación de Si-Cu-Fe-Mg-Zn en aleaciones de fundición es de aproximadamente 27%.



Figura 46. Aplicación de las diferentes aleaciones de aluminio¹⁸.



Figura 47. Composición química de las diferentes aleaciones de aluminio¹⁸.

Clasificación Manual. Como su nombre lo indica, en este proceso la separación de elementos indeseables se realiza manualmente y son puestos en diferentes contenedores para su posterior procesamiento o venta. Fue el primer método utilizado para clasificar la chatarra y sigue siendo muy popular. Los materiales separados de la chatarra varían, pero casi siempre incluyen chatarra de metal, en particular, cobre, acero, zamac, hierro, magnesio y latón.

La clasificación manual requiere mucha mano de obra, además de ser desagradable el trabajo y posiblemente poco saludable. Sin embargo, en algunas partes del mundo donde los costos de mano de obra son bajos, todavía es un método preferido para la clasificación de la chatarra. Gran parte de la chatarra no ferrosa generada por la trituración de automóviles en América del Norte y Europa se envía a China, donde la clasificación manual es menos costosa que los procesos automáticos utilizados en los países más desarrollados.

En la clasificación manual se utilizan varias técnicas de reconocimiento visual para distinguir los elementos deseables de los indeseables. El color es el más importante, permitiendo la separación del metal de los elementos no metálicos y permite la eliminación del cobre, latón, plomo y otros metales. La forma es también importante en la clasificación de chatarra, hay vajillas que generalmente son de acero inoxidable, las latas son de aluminio o de acero, las cajas de leche de plástico se producen a partir de polietileno de alta densidad, y así sucesivamente.

La clasificación manual tiene ciertas limitaciones. Las partes metálicas que están pintadas o chapadas de otros metales pueden ser identificadas erróneamente. Algunas partes se producen usando una variedad de aleaciones, de modo que su reconocimiento puede no ser suficiente como para separarlas por tipo de metal. Por último, si los costos laborales son demasiado altos, el valor de los materiales recuperados no puede justificar el costo de la clasificación.

Además existen otras tecnologías de clasificación que se utilizan actualmente en la industria para separar materiales de aluminio una vez que la chatarra ha sido triturada, estas son: separación magnética, por aire y por corrientes de Eddy.

Separación magnética. En la separación magnética, se busca separar la fracción de metal magnética de las fracciones de metal no magnética y de la no metálica, es decir, eliminar el acero, hierro y las aleaciones de níquel del resto de la chatarra de aluminio. La pieza característica utilizada en este proceso de separación es un separador de tambor magnético, que se muestra en la figura 48. El separador de tambor magnético es un imán fijo que gira alrededor de su eje, el material no magnético cae del tambor y se recoge en una cinta trasportadora, el material magnético se pega al tambor y continua haciéndolo hasta que el tambor gire más allá del campo generado por el imán entonces más adelante cae y se retira independientemente. El material no magnético cae en cinta transportadora para posteriormente caer en un recipiente. La mayoría de las piezas de hierro y acero se separan y se vende a las fábricas de acero.



Figura 48. Proceso de separación magnética.

Separación por Aire. Una vez que la chatarra de aluminio ha pasado por el proceso de separación magnética, se procede a realizar la separación por aire con el objetivo de separar los materiales no metálicos como plásticos, gomas, espumas y papel de la fracción metálica más pesada, es decir, el aluminio.

Un método de separación por aire consiste en una boquilla de succión colocada por encima de la cinta transportadora para aspirar los materiales ligeros. Otro método común de separación por aire es un elutriador, en el que la chatarra se deja caer a través de un dispositivo en forma de zigzag por el cual se hace pasar un flujo ascendente de aire, el aire es inyectado a través de la parte inferior del dispositivo empujando el material de

baja densidad hacia arriba y afuera al mismo tiempo, mientras que los materiales densos caen al fondo. El diseño en zigzag evita que el papel y el metal se peguen entre sí o bloqueen un camino gracias a la turbulencia generada. Ambos métodos se utilizan para eliminar los materiales de menor densidad que el aluminio.



Figura 49. Proceso de separación por aire mediante un elutriador.

Separación por corrientes de Eddy. La separación por corrientes de Eddy comúnmente es la tercera y última etapa de clasificación, es utilizada para concentrar aún más el aluminio. La separación por corrientes de Eddy funciona exponiendo el material a un campo magnético externo que repele las partículas no magnéticas metálicas conductoras de la electricidad. Cuando este tipo de partículas entra en un campo magnético, se produce una contracorriente en el interior de las partículas a separar y se repelen lejos del campo magnético. El efecto global es la generación de un empuje de avance en las partículas metálicas no magnéticas, causando la expulsión estos de la corriente de materiales no metálicos.

El campo magnético produce una corriente eléctrica al flujo de partículas en el conductor. Esta corriente se conoce como corriente de Eddy. La magnitud de esta corriente es determinada por el campo magnético, la conductividad eléctrica de la partícula, el tamaño y la forma de la partícula. La corriente de Eddy, a su vez genera un campo magnético secundario a su alrededor, alineado con el campo magnético generado por el imán permanente.

Cuando una partícula pasa por el campo magnético generado por un imán de polaridad inversa, este campo magnético secundario se opone al campo magnético principal. Este crea una fuerza repulsiva que envuelve a la partícula y se vuelva a alinear con el nuevo campo magnético primario desviando a la partícula de su dirección original. Un ejemplo es el magnesio y el aluminio tiene una conductividad alta y baja densidad, esto significa que pueden ser fácilmente desviados al pasar por imanes de polaridad alterna. El cobre también es buen conductor, pero la densidad es mucho mayor, como resultado la chatarra de cobre se ve menos afectada por la alternancia de estos campos. El plástico y el papel no son conductores, por lo tanto no se ven afectados por los campos magnéticos, esto se puede ilustrar con la figura 50.



Figura 50. Proceso de separación por corrientes de Eddy.

Separación por medios pesados. La Tabla 17 enlista las densidades del aluminio y los contaminantes más comunes presentes en la chatarra de aluminio. Una forma sencilla de separar estos materiales del aluminio es poner la chatarra mezclada en un fluido con una densidad comprendida entre la del aluminio y los contaminantes. Los materiales con una densidad menor que la del fluido flotarán, mientras que los más densos que el fluido se hundirá. Esta separación implica la creación de "fluidos de diseño" para permitir tales separaciones.

| Material | Densidad (g/cm ³) |
|------------------|-------------------------------|
| Aluminio | 2.7 |
| Cobre | 8.97 |
| Plata | 10.5 |
| Zinc | 7.14 |
| Plomo | 11.3 |
| Estaño | 7.28 |
| Latón | 8.4 |
| Acero Inoxidable | 7.9 |
| Magnesio | 1.87 |

Tabla 17. Densidades del aluminio y metales contaminantes.

Hay tres tipos de fluido. El primer tipo es el agua (densidad = 1,0). Todos los metales y algunos plásticos tienen densidades superiores a 1,0, pero los plásticos, la madera, el papel, etc., son más ligeros que el agua y flotarán. El uso únicamente de agua en este proceso de separación es raro para chatarras con alto contenido en metales.

La adición de una sal disuelta puede crear fluidos con densidades superiores a 1,0. El cloruro de calcio, nitrato de calcio y carbonato de potasio se utilizan con frecuencia para este propósito. La solución resultante tiene una densidad mayor que la del cloruro de polivinilo (PVC), el plástico más utilizado en los alambres recubiertos.

Soluciones con una densidad mayor que la del magnesio son difíciles de preparar. Debido a esto, estas soluciones están limitadas a solo separar los elementos no metálicos de los metálicos.

El tipo más común de líquido es una solución con sólidos suspendidos, en la que pequeñas partículas de un sólido denso se suspenden en agua. El sólido utilizado es generalmente ferrosilicio (84% de Fe y 16% de Si) o magnetita (Fe₃O₄). Estos materiales son ferromagnéticos, lo que permite separarlos fácilmente eliminándolos de la solución. También son de bajo costo, resistentes a la corrosión y no son peligrosos para el medio ambiente en caso de derramarse o desecharse. Mediante la adición de diferentes niveles de ferrosilicio o magnetita, la densidad de la suspensión puede tener valores mayores a 3,0. Esto permite el uso industrial de las dos soluciones con sólidos suspendidos. La primera, con una densidad de aproximadamente 2,0, separa el aluminio y otros materiales pesados del magnesio, plástico, y otros materiales ligeros. La segunda, tiene una densidad mayor que 2,4, el aluminio flota mientras que otros metales pesados permanecen en el fondo de la solución¹⁷.

1.3 FUSIÓN DE ALUMINIO SECUNDARIO

1.3.1 FUNDAMENTOS DE LOS HORNOS FUSORES

La mayor parte de la chatarra de aluminio que se recicla hoy en día es fundida en un horno el cual es calentado con combustibles fósiles, como gas L.P. o natural. Este tipo de hornos se han utilizado desde que comenzó el reciclaje de aluminio, y aunque el número de diseños ha aumentado, los fundamentos detrás de la fusión del aluminio siguen siendo los mismos. La comprensión de estos fundamentos es importante para entender el porqué de los diferentes tipos de diseños de los hornos que existen actualmente, además de las innovaciones en los equipos que han tenido lugar en los últimos 20 años.

TRANSFERENCIA DE CALOR Y CINÉTICA

La Figura 61 presenta una imagen sencilla de un típico horno de reverbero para la fundición de aluminio sólido. El horno es generalmente alimentado con gas natural, haciendo que el calor se transfiera desde la flama del quemador a la mezcla de aluminio sólido y/o fundido (parte inferior del horno). Aunque gran parte del calor se transfiere directamente de la flama al metal, otra cantidad se transfiere al metal de manera indirecta, es decir, el calor de la flama que se dirige a las paredes refractarias del horno. El calor "reverbera" (rebota) en las paredes y se transfiere hacia el aluminio. El calor puede rebotar entre el metal y las paredes varias veces antes de que sea absorbido por este, el aluminio refleja mejor el calor que la mayoría de los otros metales. Como resultado de esto, los hornos de reverbero tienen que tener un baño de poca profundidad, lo que maximiza el área superficial por tonelada de metal contenido.



Figura 51. Sección transversal de un horno de reverbero, se muestra la transferencia de calor por radiación.

El calor se transfiere de la flama al metal por dos mecanismos: radiación y convección. La transferencia de calor por radiación se rige por la expresión:

$$q_s = \varepsilon \sigma A \left(T_g^4 - T_s^4 \right)$$

Donde q_s es la tasa de transferencia de calor de la superficie del metal líquido, A es la superficie metálica expuesta por metro cuadrado del baño líquido (igual a 1 si el metal esta fundido, sino es menor), σ es la constante de Planck (5.67x10⁻⁸ W/m²K⁴), ε es la emisividad del aluminio en el corazón del horno y T_g y T_s son las temperaturas de la flama y del aluminio sólido, respectivamente, ε es muy baja para el aluminio pulido (\approx 0,05); cuando el metal se calienta se forma una capa de óxido gruesa en la superficie, por lo cual se incrementa ε a cerca de 0,35. A se incrementa cuando hay una capa más gruesa de chatarra sólida en el corazón del horno y se reduce cuando hay una mayor porosidad (espacios abiertos) en la capa de chatarra y por piezas grandes de chatarra en la carga. La ecuación anterior calcula sólo la tasa de transferencia de calor por radiación directa, no toma en cuenta la transferencia de calor por radiación indirecta, es decir, la que reverbera. La ecuación solo es exacta cuando la superficie de la chatarra está expuesta directamente a la radiación.

Debido a que q_s está en función de T_g^4 , si se eleva la temperatura de la flama aumenta la tasa de transferencia de calor por radiación. Sin embargo, esto tiene sus inconvenientes. Dado que la superficie está expuesta directamente hacia la fuente de radiación, esta recibe la mayoría de la radiación, por lo tanto el metal más cercano a la flama se calienta mucho más rápido que el metal que está más alejado de esta. Esto provoca un sobrecalentamiento, lo que conduce a la oxidación excesiva del metal. Lo que da como resultado, que la formación de escoria se incrementan y se funda una menor cantidad de aluminio.

La tasa de transferencia de calor por convección se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_s = h \left(T_g - T_s \right)$$

Donde q_s es de nuevo la tasa de transferencia de calor por unidad de área de la superficie del metal líquido, T_g y T_s son las temperaturas del gas sobre la superficie y del metal sólido (o líquido), respectivamente, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, determinado por la composición, presión, temperatura y las características del flujo del gas, los valores típicos de h para las condiciones de fusión son de 10 a 30 °C·W/m². Mayores presiones aumenta el valor de h, así como dirigir el flujo de gas hacia el metal en lugar de dirigirlo paralelo a este. La transferencia de calor por convección depende menos de la temperatura de la flama que la radiación, pero sigue siendo favorecida por las altas temperaturas. Por lo tanto es menos probable que cause sobrecalentamiento por la radiación. Sin embargo, también es menos eficaz en la transferencia de calor. La radiación representa el 80% de la transferencia de calor en un horno de reverbero común. Además, la turbulencia en la superficie causada por el flujo de gas puede atravesar la capa de escoria, lo que provoca la exposición del metal líquido y por lo tanto el aumento de la pérdida de metal fundido.

Una vez que el calor se transfiere a la superficie del metal, este se transfiere de la superficie hacia el resto del aluminio. En el metal fundido se transfiere en parte por la convección, en el metal sólido y la conducción juega un papel importante también. La expresión que rige la transferencia de calor por conducción por unidad de área de superficie fundida es:

$$q_c = (k/L) (T_{sur} - T_{bulk})$$

Donde k es la conductividad térmica del metal, L es la profundidad de la masa fundida, T_{sur} es la temperatura en la superficie y T_{bulk} es la temperatura de la mayor parte de la masa fundida (o carga sólida). La conductividad térmica del aluminio sólido es mayor que la del líquido, pero esta se reduce cuando hay muchos espacios entre las piezas cargadas de chatarra. El aluminio tiene una alta conductividad térmica, sin embargo la conductividad de la escoria es menor, por lo cual la transferencia de calor a través de la capa de escoria puede ser un factor limitante en la fusión.

Debido a que el calor está siendo constantemente transferido a la superficie del metal en el horno de fusión, la temperatura de la superficie será siempre mayor que la temperatura del resto del aluminio. Si la conducción es el principal mecanismo de transferencia de calor, la estratificación en el metal fundido puede ser grave, con diferencias de temperatura entre la parte superior e inferior de la masa fundida de 100°C o más. Por lo tanto el aumento del coeficiente h en la transferencia de calor por convección es importante. Puesto que la temperatura y la composición del metal son fijas, la agitación es el método más eficaz para aumentar el valor de h.

COMBUSTIÓN

La mayoría de los hornos de reverbero queman gas natural para producir energía para la fusión. El gas natural se compone principalmente de metano (CH₄), por lo general con algo de etano (C₂H₆). Además de que otros hidrocarburos y gases están presentes en concentraciones menores, la composición varía de un lugar a otro. En la combustión total del gas natural, los hidrocarburos reaccionan con el oxígeno para generar dióxido de carbono y vapor de agua:

$$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O(g)$$

La energía producida por esta reacción calienta los gases a una temperatura de flama característica. La transferencia de calor por radiación se da a partir de la flama y la de convección de los gases al metal para fundir la carga de chatarra en el horno.

Hay varias características de la flama que son ajustables. El más importante es la temperatura de flama. El aire normal contiene aproximadamente 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno. El nitrógeno no participa en la reacción de combustión, pero este absorbe la mayor parte del calor que se genera en la combustión. Como resultado de esto, las temperaturas que alcanza la flama son relativamente bajas (<2000 °C). Cuando oxígeno puro se mezcla con aire para crear una atmosfera enriquecida de este, la cantidad de nitrógeno en el horno disminuye. Con una menor cantidad de nitrógeno presente, la cantidad de calor absorbida disminuye y por lo tanto la temperatura de flama aumenta en varios cientos de grados. La temperatura de flama también se puede aumentar mediante el precalentamiento del aire alimentado.

Las altas temperaturas de flama tienen la ventaja de aumentar la tasa de transferencia de calor y por lo tanto mejorar la productividad del horno. Sin embargo, también hay desventajas. El problema de punto caliente se origina por el calentamiento excesivo por radiación, es un problema causado por las altas temperaturas de flama. Esto provoca que se acorte la vida útil del recubrimiento refractario del horno. Un problema mayor son las reacciones secundarias indeseables, que son más probables que ocurran a temperaturas de flama por encima de los 2000°C. Las más problemáticas son las reacciones entre el nitrógeno y el oxígeno que no ha reaccionado para formar óxidos de nitrógeno:

$$N_2 + O_2 = 2 \text{ NO}$$

 $N_2 + 2 O_2 = 2 \text{ NO}_2$

El NO y NO₂ son los principales constituyentes de NO_x, un problema de contaminación importante. Las reacciones anteriores se vuelven más factibles a medida que aumenta la temperatura de flama. Sin embargo, una menor presión parcial de N₂ en el gas de escape causada por el uso de aire rico en oxígeno reduce la generación de NO_x. A medida que la temperatura del gas disminuye, NO y NO₂ se descompone en N₂ y O₂ si se les da el suficiente tiempo.

Si la cantidad de oxígeno en la mezcla del combustible del quemador no es suficiente para quemarlo de inmediato, la reacción ocurre por etapas. La primera etapa es la pirolisis del combustible para generar hidrógeno y pequeñas partículas de hollín:

$$CH_4 = C + 2 H_2$$

El hollín y el hidrógeno reaccionan con más oxígeno para producir monóxido de carbono y vapor de agua:

$$C + 2 H_2 + \frac{3}{2} O_2 = CO + 2 H_2O$$

El monóxido de carbono reacciona con más O_2 para completar la combustión a CO_2 . Esta secuencia de reacciones es importante porque el hollín aumenta la luminosidad de la flama, su capacidad de irradiar. La

flama tienden a estar más diseminada por lo cual irradia desde un área mayor. Sin embargo, por la secuencia las reacciones son más lentas y tiende a generar una temperatura de flama más baja.

LA QUÍMICA DE LOS FLUX

Toda la chatarra de aluminio que se alimenta a un horno tiene una capa muy fina de óxido de aluminio en la superficie, causada por la oxidación espontánea del aluminio con el aire:

$$2 \text{ Al} + \frac{3}{2} \text{ O}_2 = \text{Al}_2 \text{O}_3$$

La capa crece muy lentamente a temperaturas normales y por lo tanto generalmente no es apreciable en la superficie. Cuando la chatarra se calienta en un horno, las altas temperaturas hacen que la capa crezca más rápidamente, especialmente si la chatarra se calienta en el aire o un ambiente oxidante.

Cuando el aluminio se funde, el Al_2O_3 flota en la superficie, formando una segunda fase conocida como escoria. Debido a la tensión superficial de esta capa, el aluminio metálico es atrapado en la escoria. El contenido de metal en la escoria puede ser desde 15 a 80%, dependiendo de las condiciones de fusión. Por esto, la reducción de la pérdida de metal por la escoria es una consideración importante en la refundición de chatarra.

Una de las opciones disponibles para reducir la pérdida de metal es el uso de flux de escoria diseñados para romper la capa de óxido y liberar el metal atrapado. Los requisitos que debe tener un flux son los siguientes:

-Debe cubrir el metal fundido y limitar la oxidación
-Debe disolver o suspender la suciedad, óxidos y otras sustancias no metálicas
-Debe promover la coalescencia de las gotas de metal en la escoria al eliminar la capa de Al₂O₃
-Debe tener un punto de fusión más bajo que el del aluminio (660 ° C)
-Debe de tener una densidad menor que la de aluminio fundido (2,3 g/cm³)
-No debe reaccionar con el aluminio fundido o contaminarlo
-No debe atacar el refractario del horno
-Debe tener una baja presión de vapor
-No debe ser higroscópico (evitar la adsorción del agua)
-Debe tener una viscosidad baja
-Debe de separarse fácilmente del metal

Estos requisitos a reducen la lista de los materiales disponibles a una pequeña lista de las sales de cloruro y fluoruro. Con el tiempo, se ha encontrado una composición base del flux, 50% de NaCl y 50% de KCl. Sin embargo, mientras que este flux es eficaz para cubrir el metal y disolver los óxidos hasta cierto punto, es menos eficaz para provocar la coalescencia. Se sabe que la adición de niveles de sales de flúor en el flux de escoria promueve la unión y genera una escoria con menos metal. La adición de flúor más popular es la criolita (Na₃AlF₆), pero el NaF y KF también son eficaces.

Se ha demostrado en repetidas ocasiones que las adiciones de flúor (en particular Na₃AlF₆, NaF y KF) reducen la tensión superficial del flux en el aluminio fundido, lo que provoca que el flux se reacomode a lo largo de la superficie de la gota. Mientras esto sucede, la capa de óxido se separa del metal¹⁷.


Figura 52. Efecto del fluoruro en los flux de aluminio en fusión de la gota en la escoria fundida.

SELECCIÓN DEL HORNO DE FUSIÓN

La selección del equipo de fusión depende de las condiciones particulares de la fundidora. El método de calentamiento del horno que se selecciona suele ser el más barato y el más fiable para las condiciones de la fundidora. Sin embargo, el problema de la elección del horno no es sencilla, ya que, además de la fiabilidad y el costo de la fuente de calentamiento, otros factores tales como los costos iniciales del equipo de fusión de instalación, costos de mantenimiento, condiciones de trabajo en el área de fusión, de control de la temperatura, la cantidad de metal necesario por turno, el método de vaciado y el tipo de material cargado todos estos factores debe ser considerados.

En general, una mejor calidad de metal fundido, un control de temperatura más exacto y mejores condiciones de trabajo en el área de fusión se obtienen mediante el uso de hornos eléctricos. Los recientes aumentos en el costo del petróleo y del gas y la falta de fiabilidad de su suministro en algunas localidades han ayudado a producir una tendencia a favor de los hornos eléctricos. Sin embargo, en algunos lugares, la energía eléctrica es muy costosa.

La necesidad de una gran cantidad de metal o de fundir chatarra de gran tamaño puede hacer que se requiera el uso de un horno de reverbero obligatoriamente. Para fundir chatarra más pequeña, como rebabas, recortes y virutas, el horno eléctrico de baja frecuencia puede ser una buena elección.

La cantidad de metal requerido por turno, el tipo de vaciado y el tamaño de las piezas de fundición, determinan en gran medida el tamaño de la unidad de fusión. Los hornos de reverbero y hornos eléctricos de inducción no son adecuados para la fundición donde se requieran cambios frecuentes en la composición de la aleación.

La absorción de las impurezas es también una consideración importante en la selección del equipo de fusión. Además de la absorción de hierro de las herramientas de hierro fundido y recipientes, también existe la posibilidad de puntos de absorción de silicio por la reducción parcial del ladrillo refractario de baja alúmina y refractarios similares utilizados como revestimientos del horno. Esto no es generalmente un problema serio, ya que la gran mayoría de las aleaciones de fundición base aluminio contienen cantidades sustanciales de silicio como principal elemento de aleación. Sin embargo, la absorción de silicio de los refractarios, cuando la fusión de aleaciones de aluminio contiene grandes cantidades de magnesio o zinc como principales elementos de aleación, puede ser muy grave porque el silicio es una impureza muy nociva en las aleaciones de este tipo. Revestimientos de alta alúmina reducen este problema. Como ya se mencionó anteriormente el aluminio a temperaturas elevadas tiende a combinarse con el oxígeno, formando óxidos. A medida que la temperatura aumenta durante la fusión, aumenta la cantidad de óxidos. La agitación del metal fundido también provoca que los óxidos se formen más rápidamente y se debe evitar tanto como sea posible. El baño metálico en un horno de reverbero es más susceptible a la formación de óxidos que en un horno de crisol o en un horno de inducción de baja frecuencia debido a que el área de la superficie es mayor por libra de metal que se expone a la atmósfera. La atmósfera dentro de los hornos de reverbero puede ser regulada en cierta medida, y si esto se hace cuidadosamente, se consigue una cierta reducción en la oxidación del metal fundido.

1.3.2 TIPOS DE HORNOS FUSORES PARA ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

Los nuevos usos para los productos de fundición de aluminio, incluyendo la sustitución de otros materiales tradicionales, así como la producción de grandes piezas de fundición, han dado lugar a una demanda de métodos más económicos y rápidos en la fusión y manipulación del aluminio.

Los hornos pueden ser calentados con aceite, gas o electricidad. Los hornos de gas y de aceite son los más comunes, pero recientemente el horno de inducción de baja frecuencia está siendo muy utilizado, aunque todavía representa una parte relativamente pequeña de la capacidad total del horno.

Los hornos calentados con combustible son de dos tipos: de flama indirecta, en el cual los productos de combustión no entran en contacto con la carga de metal y el horno de flama directa, en el que los productos de combustión pasan directamente sobre la carga. Los hornos de flama indirecta pueden ser del tipo de crisol refractario con salida ascendente, estacionario o basculante. Los tipos de hornos más comunes de flama directa son el de reverbero y de barril.

HORNOS DE CRISOL

El concepto crisol fue la columna vertebral para el inicio de la industria de la fundición. Pueden ser de tres tipos, dependiendo de que utilicen para calentarse: combustibles fósiles, resistencias eléctricas y de inducción. Normalmente están equipados con un crisol de carburo de silicio o de hierro fundido recubierto con pintura refractaria, con una capacidad de 50 a 250 kg. El calentamiento se efectúa con gas y la flama producida por el quemador ataca tangencialmente la base del crisol con el fin de que los gases de combustión giren alrededor de él con un movimiento ascendente y helicoidal. Los modelos más recientes de estos hornos basculan alrededor del pico de colada, para mantener una altura constante de caída del metal mientras dura el vaciado. La transmisión de energía al metal que se quiere fundir, al realizarse indirectamente a través de la pared del crisol, causa un escaso rendimiento térmico y un consumo de combustible importante, además; la necesidad de remplazar periódicamente los crisoles aumenta el costo de la fusión.

Los hornos de crisol suelen dividirse en tres clases, según el procedimiento empleado para colar el metal líquido contenido en los crisoles. En los hornos de crisol, los crisoles están totalmente dentro de la cámara del horno.

En los hornos de crisol fijo no basculables (hornos estáticos de crisol fijo) existe un solo crisol fijo en el horno y que sobresale de la cámara de calefacción, por lo que los gases de combustión no pueden tener ningún

contacto con el metal líquido: como no es posible bascularlos para colar, su contenido solo puede pasarse a los moldes sacándolo del crisol del horno con una cuchara. Son adecuados cuando se necesita tomar pequeñas cantidades de metal a intervalos frecuentes. Pueden emplearse como hornos de espera con la sola misión de mantener el metal en estado líquido. Su rendimiento térmico es más bajo para la fusión, sobre todo cuando se trabaja a temperaturas altas.

Los hornos basculables de crisol fijo son análogos a los anteriores, pero toda la estructura del horno puede inclinarse para colar el metal líquido por vertido en cucharas o directamente a los moldes; el eje de rotación del horno puede ser central o transversal a la piquera de colada y situada precisamente en el pico de ésta; en este último caso el contenido del crisol del horno se vierte íntegramente en la cuchara sin mover ésta. O bien directamente en los moldes.

| Tipo de horno | Rendimiento térmico |
|--|---------------------|
| Horno de crisol basculable, calentado con coque. | 8 a 13% |
| Horno de crisol basculable, calentado con aceite o gas. | 7 a 18% |

Tabla 18. Rendimientos térmicos relativos de diferentes tipos de hornos de crisolcalentados con combustibles.

Horno de crisol calentado con gas. El horno está constituido por una carcasa aislante exterior de acero de 6 a 9 pulgadas con un crisol de carburo de silicio en el centro. Los hornos de crisol actuales de gas se calientan normalmente con quemadores combinados compactos o quemadores de alta velocidad. Desafortunadamente, son el método menos eficaz de fusión debido a la cámara de combustión compacta y las restricciones de precios de los quemadores recuperativos. El uso de quemadores de dosificación con alta rotación hacia abajo y un buen aislamiento puede mejorar el rendimiento del horno.



Figura 53. Horno de crisol calentado con gas.

Horno de crisol de resistencia eléctrica. En su mayoría comúnmente se calienta con elementos metálicos o de carburo de silicio. Estos hornos están bien aislados con fibra cerámica. En los hornos eléctricos de resistencia la energía necesaria para la fusión se obtiene por efecto Joule en las resistencias dispuestas en la bóveda del horno. Es irradiada directamente sobre el metal. Las resistencias están constituidas por alambres en espiral, formados por aleaciones refractarias como: Ni-Cr (80-20%), Ni-Cr-Fe, o Cr-AI-Fe-Co.

La vida de los elementos calefactores está en función del calibre del elemento y de la temperatura de funcionamiento. Los elementos de mayor calibre duran de dos a tres veces más que los elementos de calibre fino en aplicaciones de fusión. Estos hornos se utilizan comúnmente para la operación de holding a la hora de la colada.



Figura 54. Hornos de crisol de resistencias eléctricas.

Horno de crisol de inducción. Este es un nuevo concepto de diseño, que transfiere la energía eléctrica directamente al crisol resultando en una mayor eficiencia en la fusión. Dado que la mayoría de la energía eléctrica (más del 90%) se concentra en el crisol todos los demás componentes del horno se mantienen relativamente fríos. Se logra una fusión rápida sin excederse en la temperatura como comúnmente sucede en los hornos de crisol.



Figura 55. Horno de crisol de inducción.

HORNOS DE REVERBERO

Los hornos de reverbero: son hornos calentados por medio de combustible líquido o gaseoso, la energía necesaria para la fusión se produce por uno o varios quemadores alimentados por estos tipos de combustibles; cuyas flamas inciden directamente sobre la carga metálica. Los gases de combustión provocan, en la atmósfera del horno, movimientos intensos de convección que mejoran los cambios térmicos con el metal que se funde, por estas razones, la velocidad de fusión es mayor y el consumo de combustible es menor que en el caso de los hornos de crisol.

Típicamente, el horno de reverbero tiene una capacidad de 2000 a 200000 lb de aluminio. Este tipo de hornos también recibe el nombre de hornos de corazón y su "auge" comenzó a mediados de los años 70s.

Este tipo de horno lleva algunas veces una solera de fusión inclinada, sobre la que se introduce la carga metálica. El metal fluye por el hogar a medida que transcurre la fusión, permaneciendo los óxidos en la solera, que periódicamente es desescoriada.

Estos hornos presentan una forma rectangular o cilíndrica, los cuales tienen una bóveda móvil, de manera que se puede efectuar la carga rápidamente por la abertura superior del mismo.



Figura 56. Horno de reverbero.

En la disposición más normal, los quemadores están colocados sobre uno de los lados pequeños del horno y los gases de combustión se evacuan por una chimenea situada en el lado opuesto. Las puertas de carga y desescoriado están colocadas en los lados pequeños y grandes del horno. En algunos casos, los quemadores se montan en oposición en las cuatro esquinas del horno, pero esto debe ser evitado, porque tiende a provocar una zona de presión en el centro del horno, que perturba el funcionamiento de los quemadores.

Es preferible adoptar una disposición en la que el recorrido de los gases de combustión en el horno, antes de su evacuación por la chimenea sea el más largo posible, de manera que se incrementen los intercambios térmicos con la carga metálica. Se pueden mejorar notablemente los intercambios térmicos al inclinar la bóveda ante los quemadores y esto permite aumentar la energía irradiada por la bóveda y aproximar los gases de la combustión a la carga antes de su evacuación por la chimenea, de esta manera puede ceder de manera útil una parte importante de su calor sensible.

Los quemadores empleados son del tipo de inducción de aire y en los hornos más modernos, del tipo de mezcla preliminar si se trata de combustible tipo gas. En caso de utilizar este combustible, tenemos un mejor control del caudal de aire primario, del aire secundario y del combustible. Estos hornos resultan relativamente poco costosos y sus gastos de mantenimiento son reducidos. El revestimiento refractario puede durar de 1 a 3 años, en marcha continua, dependiendo de la naturaleza de la carga y la forma de efectuarla, etc. El consumo de combustible, en funcionamiento continuo, es del orden de 80 a 130 l/t en el caso de los combustibles líquidos y de 110 a 130 m³/t en el caso del gas natural.

Estos hornos presentan ciertos inconvenientes:

-Una aportación de calor irregular al originarse "golpes de fuego" que den lugar a un sobrecalentamiento local (sobre todo al usar quemadores de combustibles liquidas). Esto se remedia al alejar la llama de los quemadores de la superficie del baño e instalando una regulación pirométrica en los quemadores.

-Los productos de combustión, al estar en contacto con la carga que se va a fundir y con el baño, provocan cierta oxidación del metal (pérdidas por quemado) y absorción del hidrógeno. Es posible reducir tales inconvenientes al situar los quemadores en el fondo de la cámara de combustión y evitando dirigir la llama contra la carga.



Figura 57. Tablero de control de un horno.

Las pérdidas por oxidación del metal llamadas "Pérdidas por Quemado" se pueden reducir al proteger la carga durante la fusión con fundentes especiales y dejando un "pie de horno" liquido, después de cada fusión, de modo que se pueda sumergir rápidamente el metal sólido desde el comienzo de la carga. Este "pie de horno" tiene la ventaja de desempeñar el papel de acumulador térmico y de acelerar de ésta forma la fusión.

En hornos de reverbero con quemadores de combustibles líquidos, el "pie de horno" representa del 25-50% de la capacidad total del mismo.

Tipos de hornos de reverbero:

Existen diferentes tipos de hornos de reverbero, los cuales se describen a continuación:

-HORNOS DE CORAZÓN HÚMEDO: Son aquellos en que los productos de la combustión están en contacto directo con la superficie del baño metálico y la transferencia de calor está dada por convección y radiación.

-HORNO DE CORAZÓN SECO: Se carga el metal arriba del baño metálico, por lo que la carga se encuentra en contacto con los gases calientes. El calor es absorbido por la carga sólida. Las altas temperaturas y la flama pueden causar oxidación y otro tipo de residuos que se acumulan en los depósitos del refractario. Con una limpieza periódica se puede controlar éste problema. De este tipo de horno se obtiene un material de buena calidad.



Figura 58. Horno de corazón seco.

-HORNO DE CORAZÓN SECO CARGADO FRONTALMENTE. Este horno cuenta con una puerta que abarca todo el ancho lo que proporciona un acceso completo al interior del horno. La carga se realiza mediante un montacargas o más comúnmente con una máquina de carga especial. Las ventajas de este diseño incluyen la capacidad de drenar completamente el horno para operaciones por lotes y poder alcanzar un índice de fusión relativamente alto. La desventaja de este tipo de horno es que normalmente requiere más de una carga para llenarse debido a la geometría del horno. Este horno es ideal para procesos de medianos a grandes y aleaciones de múltiples especificaciones¹⁹.



Figura 59. Horno de corazón seco cargado frontalmente.

-HORNO DE BARRIL BASCULANTE: El horno de barril basculante se ha utilizado para la fusión de piezas de chatarra de die casting, fundición y recortes del proceso de fundición. Este tipo de chatarra tiene una densidad relativamente alta en relación con su área superficial, lo que ayuda a sumergir el material por debajo de la superficie del baño cuando está es cargada. Normalmente hay algunos residuos en la superficie de la chatarra, como lubricantes, grasas, etc., que se quemarán durante la actividad la fusión, así que mantener el metal lejos del oxígeno es esencial para minimizar la formación de escoria. El metal se retira del horno basculándolo sobre su eje.



Figura 60. Horno de barril basculante.

El revestimiento refractario consiste de ladrillos de alúmina en el área de contacto con el metal y de ladrillos de alta resistencia en la parte superior del horno. El ladrillo tiene forma de arco para producir un revestimiento estable cuando el horno está frío. A medida que el horno se calienta, el ladrillo se expande para formar un sistema de unión muy estrecho que no permite la penetración del aluminio fundido. Esto permite que el horno se enfríe sin que sufra daños, lo cual es común en un horno de pared recta cuando se enfría. Puede tener capacidades que van de las 5 a las 10 TM, y funde de 0,5 TM/ hora a 1,5 TM/hora.

-HORNO ROTATORIO. Este horno es similar al horno de barril de manera general, la única diferencia es que gira completamente alrededor del eje central. Se utiliza para la fundición de piezas de chatarra de fundición, chatarra de extrusión, UBC, y procesamiento de la escoria. Este tipo de chatarra tiene una densidad relativamente baja en relación con su área superficial. Esta característica requiere que el material se funda rápidamente para que la sección transversal del material fino no se oxide.

La acción rotativa del horno da como resultado que la carga se caliente por la parte de arriba por la radiación de la flama y en la parte de abajo por el refractario caliente. La rotación asegura un desgaste uniforme en el revestimiento.

El horno consiste en un tambor de acero de 25 mm de espesor, proporcionando estabilidad al revestimiento refractario. El sistema basculante hidráulico maximiza el volumen de carga con una inclinación de 10 grados hacia atrás y proporciona el control con un grado de inclinación de hasta 42°. El horno utiliza un accionamiento de giro eléctrico que puede ser variado de 0 y 9 rpm y se puede girar a lo largo de toda la gama de ángulos de inclinación.

El horno puede ser calentado con aceite o gas natural, aire frío, aire precalentado, o con un sistema de combustión de oxigás.

Puede tener capacidades que van de las 2 a las 12 TM, y funde de 0,5 TM/hora a 4 TM/hora. Este horno es adecuado para la fundición de diferentes aleaciones que pueden requerir cambios frecuentes de metal y el procesamiento de muchos tipos de chatarra. El horno puede procesar chatarra limpia y sucia con el equipo adecuado para reducir la contaminación²⁰.



Figura 61. Horno rotatorio.

| Tipo de Horno | Rango de BTU/LIBRA | Rango de Metal Perdido (%) |
|---------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| Crisol Gas | 2500 - 4000 | 1 - 3 |
| Crisol Eléctrico | 716 - 887 | 1 - 1.5 |
| Inducción sin núcleo | 560 - 590 | 1 - 1.5 |
| Corazón seco | 1500 - 2000 | 2 - 4 |
| Reverbero baño húmedo | 1500 - 1800 | 1.5 - 3 |
| Horno de barril | 1500 - 1800 | 1.5 - 3 |
| Horno de chimenea | 1100 - 1300 | 1 - 2 |
| Horno de corazón seco con chimenea | 1200 - 1400 | 1.5 - 3 |
| Horno regenerativo de baño húmedo | 1000 - 1300 | 1.5 - 3 |
| Reverbero eléctrico | 716 - 853 | 1 - 1.5 |

Tabla 19. Rango de merma en la fusión de aluminio en función del tipo de horno¹⁹.

1.3.3 PARÁMETROS DE FUSIÓN EN LOS HORNOS FUSORES

Como se mencionó, hay varios tipos de hornos de fundición a gas para la chatarra de aluminio. Estos hornos tienen muchas partes en común. Los avances en el diseño de estas piezas afectarán a todos los tipos de hornos. Estos avances incluyen la creación de accesorios (equipo que se adjunta al cuerpo principal del horno), ya sea para el uso ocasional o semicontinuo. El propósito de estas piezas y accesorios es cumplir con un objetivo común, fundir la chatarra de aluminio en el menor tiempo posible, con la mayor eficacia posible y la menor pérdida de metal.

QUEMADORES



Figura 62. Quemadores en un horno de fusión.

Los desarrolladores de mejoras en los quemadores tratan de cumplir con varios objetivos:

-Mejorar la eficiencia térmica, que es inferior al 30% en muchos hornos

-Disminuir los costos de combustible

-Aumentar la tasa de transferencia de calor a la carga, lo que genera un aumento en la productividad del horno

-Disminuir la pérdida de metal

-Aumentar la vida del refractario

-Disminuir las emisiones de contaminantes, en particular NO_x

Algunas de las tendencias más importantes en el diseño de los quemadores y la operación se describen a continuación:

USO DE AIRE ENRIQUECIDO CON OXÍGENO

Las dificultades causadas por el 79% de nitrógeno que hay en el aire se mencionaron anteriormente. Por este motivo, en algunos hornos se enriquece el aire de la combustión adicionándole oxígeno. La figura 63 ilustra el efecto en la temperatura de flama provocado por el enriquecimiento de oxígeno. Como se mencionó anteriormente, mientras más caliente este la flama la transferencia de calor se dará más rápidamente hacia el metal, mejorando la productividad. El porcentaje de nitrógeno reducido en la combustión causado por el enriquecimiento de oxígeno se traduce en menores pérdidas de calor por el nitrógeno y por lo tanto una eficiencia más alta.



Figura 63. Efecto del enriquecimiento de oxígeno en función de la temperatura de flama usando gas natural.

En la Figura 64 se muestra otro de los efectos benéficos por enriquecimiento de oxígeno: se incrementa la velocidad de flama. Como se señaló anteriormente, la transferencia de calor por convección aumenta si la turbulencia del gas se incrementa. Esto es especialmente útil cuando se tiene que calentar aluminio macizo.



Figura 64. Efecto del enriquecimiento de oxígeno en la velocidad de flama de gas natural.

Sin embargo, el enriquecimiento de oxígeno presenta ciertas dificultades. A temperaturas más altas de flama se mejora el calentamiento, pero también puede conducir al sobrecalentamiento y aumentar la perdida de metal.

Además, a temperaturas más altas de flama se presenta una mayor degradación del refractario por encima de la línea de fusión. Finalmente, el aumento de temperatura en la flama fomenta la formación de NO_x. Como resultado de esto, los diseños de quemadores para el uso de aire enriquecido con frecuencia incluyen características especiales para no excederse en la temperatura de la flama y favorecer la descomposición de NO_x. Debido a que los mayores beneficios por enriquecimiento de oxígeno se encuentran en las etapas iniciales, el enriquecimiento con oxígeno en la combustión suele ser limitado a niveles inferiores al 30% de O₂.

REGENERACIÓN

La regeneración es una técnica de recuperación de calor en la combustión de los gases de escape, se introdujo en la industria de reciclaje de aluminio en la década de 1980. La figura 65 ilustra el principio de los quemadores regenerativos. En este caso los quemadores están montados en los extremos opuestos del horno. Cada quemador tiene una cama de regeneración, compuesta de un cerámico no reactivo. Cuando el quemador en la parte izquierda se encuentra en funcionamiento, los gases de escape se extraen a través de la cama de regeneración de la derecha. La cama absorbe el calor de los gases de escape, calentados en el proceso. Posteriormente, el quemador de la izquierda se cierra y el de la derecha se enciende. Cuando esto sucede, el aire de combustión es arrastrado a través de la cama de regeneración caliente. El aire se calienta previamente en la cama. Al mismo tiempo, la cama de regeneración de la izquierda se abre para recibir los gases de escape, y se calienta a su vez. Cuando la cama de regeneración de la derecha ha consumido la mayor parte de su calor almacenado, el quemador de la izquierda entra en funcionamiento de nuevo y se repite el proceso. Por el precalentamiento del aire, aumenta la regeneración de la temperatura de flama, mejorando la productividad del horno. Además, la recuperación del calor de los minimiza las pérdidas de calor del horno, lo que disminuye los costos de combustible. Debido a que el efecto de la regeneración es similar al de enriquecimiento de oxígeno, las dos técnicas se usan muy poco, al mismo tiempo. La regeneración también presenta las mismas desventajas que el enriquecimiento de oxígeno: una mayor pérdida de metal, un mayor desgaste del refractario y una alta generación de NO_x.



Figura 65. Esquema de quemadores regenerativos en un horno de reverbero.

MANIPULACIÓN DE LA FLAMA

Los operadores de los hornos han aprendido que tipos de flama se desean en las diferentes etapas del proceso de fusión. Por ejemplo, durante las primeras etapas de la fusión, la baja emisividad (ɛ) del aluminio metálico hace que la transferencia de calor por radiación sea difícil. Por lo tanto se desea una flama que transfiera la energía por convección. Después de que el metal se funde, la capa de escoria en la parte superior absorbe más radiación y además la alteración de la capa de escoria por la turbulencia de los gases de escape aumenta la pérdida de metal fundido. Debido a esto, en esta etapa se prefiere una flama que irradie más energía. Además, una flama que irradia en una mayor área en lugar de un solo punto reduce el sobrecalentamiento del metal y el refractario.

Como respuesta a esto, los fabricantes han desarrollado diseños de quemadores que manipulan las flamas de diversas maneras. Una manipulación común es la llamada flama plana, en la que se busca hacer la flama más delgada, en lugar de tener una flama cónica. La introducción progresiva de aire o de combustible ayuda a difundir la llama sobre un área, en lugar de un solo punto. La introducción progresiva de aire también ayuda a que se dé la combustión del combustible inicial que no se quemó. Esto se traduce en una pirolisis. El hollín creado por la pirolisis hace que la llama sea más luminosa, favoreciendo la transferencia de calor por radiación. El aumento de la velocidad de aire y combustible ayuda a generar una flama larga, lo que reduce el sobrecalentamiento.

RECUPERADORES

Los recuperadores desempeñan una función similar a los regeneradores que recuperan el calor de los gases de escape del horno y lo utilizan para precalentar el aire de combustión. Las principales diferencias entre ambos son que los recuperadores son una pieza separada del equipo, en lugar de ser una parte integral del quemador como se mostró en la figura anterior y los recuperadores operan en una base de estado estable, en lugar de la operación semicontinua de los regeneradores.

La figura 66 ilustra un típico recuperador de convección de la década de 1980. Como su nombre lo indica, el principal método de transferencia de calor en estos dispositivos es por convección de los gases de escape calientes a la superficie de los tubos de metal, a través de los cuales el aire frío de combustión ingresa. La transferencia de calor por convección desde la superficie interior de los tubos calienta el aire de combustión. Los tubos metálicos (níquel) se han utilizado debido a su alta conductividad térmica. Sin embargo, el uso de fundentes en los hornos de fusión crea problemas en los recuperadores, ya que los vapores de halogenuros emitidos por las sales fundidas corroen los tubos a temperaturas superiores de 540°C. Como resultado, el aire de combustión no puede ser pre-calentado por encima de los 350 a 400°C.

Una de las soluciones a este problema es la sustitución de los tubos de metal por unos de cerámica con alta conductividad térmica, como el carburo de silicio. Estas cerámicas son más caros y menos conductores que los tubos de metal, pero tienen el potencial de permitir que el aire se precaliente por encima de los 800°C.



Figura 66. Esquema de un recuperador con conjuntos de tubos de choque

REFRACTARIOS

Los problemas del rendimiento de los refractarios en hornos de fundición de aluminio se describieron anteriormente. Las soluciones varían de un operador a otro, pero algunas tendencias son evidentes:

• El desplazamiento de ladrillos hacia el revestimiento monolítico. Estas son más baratas de instalar y no tienen articulaciones de penetrar. Sin embargo, revestimientos monolíticos no tienen la misma resistencia mecánica

como ladrillos, y por lo tanto se dañan más fácilmente cuando la carga es objeto de dumping en el horno. El desarrollo de hormigones de cemento de baja y se mezcla haciendo fuego ha sido especialmente significativo.

• El uso de agentes no mojantes en los revestimientos para limitar la penetración de metal. El sulfato de bario es el más común de estos, fluoruro de aluminio y de fluoruro de calcio se utilizan a veces también.



Figura 67. Estructura de un refractario para hornos de reverbero.

AGITACIÓN

El término agitación abarca una amplia gama de tecnologías, a menudo diseñadas para las arquitecturas de hornos específicos. Con la agitación se pretende lograr uno o más de los siguientes objetivos:

-Eliminación de los gradientes térmicos. Debido a que el calor se transfiere por completo de la parte superior del horno de fusión a la carga, la temperatura del metal fundido en la parte superior puede ser de hasta 100°C mayor que en la parte inferior. Los gradientes térmicos provocan la formación excesiva de escoria y por lo tanto la pérdida de metal. Agitando se homogeniza la temperatura del metal, mejorando la calidad del producto y reduciendo la pérdida de metal. También se reduce la temperatura en la superficie del baño metálico.

-Inmersión de la chatarra ligera. La chatarra ligera como envases de bebidas (UBCS) tiende a flotar en la superficie del metal fundido cuando se carga. Provocando que este tipo de chatarra se oxide rápidamente, por lo que sumergirla en el baño metálico tan pronto como sea posible es importante.

-Eliminación de inclusiones. Si bien el control de calidad en las fundidoras requiere de una filtración, las inclusiones más grandes en el aluminio fundido pueden ser eliminadas, ya sea por flotación insuflando burbujas de argón o por adherencia en las paredes del horno. Al agitar se consigue esto de una manera más fácil.

-Mayor velocidad de fusión. La agitación aumenta el coeficiente de transferencia de calor por convección (h), mejorando la transferencia de calor desde la parte superior del baño metálico al metal o chatarra que se encuentra abajo. Esto aumenta la velocidad de fusión.

Los numerosos dispositivos utilizados para agitar el metal fundido se pueden separar en cinco tipos básicos de dispositivo: inyección de burbujas, bombas mecánicas, agitadores neumáticos, bombas electromagnéticas y agitadores electromagnéticos¹⁷.

1.3.4 CONSIDERACIONES PARA LA FUSIÓN DE ALUMINIO SECUNDARIO

Es común que la chatarra ligera flote en la superficie del metal fundido a pesar de que el aluminio sólido es aproximadamente 15% más denso que el aluminio fundido. Las piezas individuales de la chatarra pueden no ser capaces de romper la tensión superficial o la película de óxido del aluminio fundido. Mientras más gruesa sea la capa de escoria, las piezas grandes tenderán a flotar.

La chatarra que está flotando en la superficie del metal fundido se calienta mientras se expone a la atmósfera oxidante. Esto conduce a tasas de oxidación altas y una mayor generación de escoria. Además, la transferencia de calor por contacto directo con el metal líquido es superior a la de la radiación a estas temperaturas. Esto se desprende de la experiencia de que la chatarra en una plataforma en el interior de un horno necesita mucho tiempo para fundirse. Por lo tanto esta chatarra flotante se funde en mayor tiempo.

Para alcanzar una mayor tasa de transferencia de calor y disminuir la oxidación de la chatarra ligera, la inmersión rápida de esta es importante. Existen muchas maneras de sumergir la chatarra. Unas de las principales son las siguientes:

- a) Agitar el metal fundido mecánicamente o por electromagnetismo
- b) Introducir la chatarra directamente en el seno del baño líquido
- c) Disparar la chatarra al metal fundido
- d) Compactar la chatarra antes de cargarla



Figura 68. Métodos de inmersión de la chatarra ligera.

Por el diseño que tiene el horno de reverbero, primeramente se calienta la superficie por lo que el fondo del baño tiende a estar a una menor temperatura que la superficie. Por esta razón en el horno se presentan dos tipos de depósitos en el refractario:

-Depósitos en el piso del horno: son depósitos formados por materiales que son los últimos en fundirse, como el hierro, manganeso, cromo, acero y cobre; si no son limpiados y removidos, estos depósitos van creciendo al mismo tiempo que disminuyen la eficiencia del horno. Al reducir la diferencia de temperaturas, en 4°C, entre la superficie y el fondo del horno con una mejor circulación, se puede incrementar el rango de fusión en un 30%.

-Depósitos en Líneas: los óxidos de aluminio, arena, y materiales ligeros flotan y son recolectados en la superficie del baño. Frecuentemente se forman ciertas composiciones con el refractario y éstas se depositan en las paredes del horno. Para evitar éste tipo de problema es recomendable una limpieza periódica.

La fusión de aluminio resulta en la formación de óxidos que varían en densidad, por lo que pueden flotar o hundirse. Esto es minimizado al usar un horno de corazón seco.

Al estar la escoria muy caliente, se oxida el aluminio en la superficie y esto da como resultado pérdidas de aluminio y elementos de aleación²¹.



Figura 69. Escoriado en un horno de reverbero.

Optimización de la calidad del metal y prolongación de la vida del horno.

-Control de la Temperatura: el aluminio es muy reactivo y lo es más a temperaturas altas. Se debe saber que el rango de oxidación del aluminio es de 770 a 800 °C, por lo que no es recomendable pasar de este rango ya que se podría tener una menor eficiencia en los procesos de control como la porosidad por hidrógeno, refinamiento de grano, modificación por silicio y perdidas de aleantes como magnesio, berilio, boro, sodio y litio.

-Efecto de la temperatura del refractario en la vida del mismo: una operación continua sin períodos de "enfriamiento" extiende la vida del horno. El cambio de temperaturas causa fracturas. El usar métodos infrarrojos u ópticos es una ayuda para buscar las fallas en el piso o paredes del refractario. El horno debe ser precalentado antes de cargar, esto permite que el refractario se expanda y cierre las fracturas; si es fundido el metal en un horno frío, el metal llenará las ranuras o fracturas y el refractario será más débil.

-Efecto de las Técnicas de carga al horno en la calidad del Metal: la carga debe ser compactada, secada y precalentada, a continuación se muestra el efecto de precalentar la carga.

En la siguiente tabla se enlistan las cantidades de calor y porcentaje del total de energía requerido para calentar al aluminio a diferentes temperaturas. Esto nos indica la importancia del precalentamiento, esto es, se toma el 41% de la energía del horno para calentar aluminio a 425°C; por lo que al precalentar la carga a esta temperatura, se incrementa la capacidad de fusión del horno y se reduce el tiempo de fusión del mismo.

| Temperatura (°C) | kJ/kg | Total (%) | Acumulado (%) |
|------------------|-------|-----------|---------------|
| 20 - 450 | 484 | 41 | 41 |
| 425 – 600 | 186 | 16 | 57 |
| Liq — Sol | 395 | 33 | 90 |
| 660 - 770 | 116 | 10 | 100 |

Tabla 20. Energía Específica requerida para calentar aluminio a diferentes rangos de temperatura.

Deben tomarse las siguientes consideraciones al cargar los diferentes aleantes:

-Si se adicionan metales ligeros como el sodio, calcio, litio y magnesio deben ser sumergidos para prevenir pérdidas.

-El silicio flota por lo que debe ser sumergido en el metal antes de que ocurra la oxidación de la superficie.

-Metales pesados como el cobre y plomo se hunden y esto ocasiona que no se disuelvan rápidamente, por lo que deben ser suspendidos en el baño por medio de una canasta.

-El zinc y el estaño causan problemas especiales ya que son pesados y de bajo punto de fusión y se evaporan, una carga equivocada de éstos materiales puede provocar hoyos en el fondo del horno. Por ejemplo, cuando se carga zinc directamente, este se evapora, el vapor se escapa por los poros del refractario y se condensa cuando llega al piso, se solidifica y se expande fracturando el refractario. Para evitar esto, el zinc y estaño deben ser cargados usando una canastilla de acero arriba del piso del horno.

-Los quemadores utilizan generalmente una mezcla de gas-aire, se debe controlar dicha mezcla y la flama; también deben ser limpiados periódicamente.

1.4 PROCESO DE ALEACIÓN DEL ALUMINIO

Una aleación, es una mezcla de dos o más elementos, en donde al menos uno tiene que ser un metal. Las aleaciones tienen estructuras relativamente sencillas tales como la del latón, que es una aleación binaria (dos metales de 70% Cu y 30% Zn. Otras aleaciones pueden ser extremadamente complejas como la superaleación de base níquel Inconel 718 utilizada para componentes de motores a reacción que contiene unos diez elementos en su composición nominal.

En esas aleaciones puede haber varios tipos de fases, y frecuentemente una de esas fases (que a veces es la única presente) es una solución sólida. Una fase es una región de materia homogénea; al estado sólido, ella tiene asociada composición, estructura cristalina y propiedades que le son propias. Entre las aleaciones

metálicas simples, constituidas por una única fase se encuentra la aleación de aluminio 5083; en este caso la fase presente es esencialmente una solución sólida de sustitución de Mg disuelto en una matriz de Al.

Así, el tipo más sencillo de aleación es el de solución sólida. Una solución sólida es un cristal que consta de dos o más elementos que están atómicamente dispersos, formando una única estructura (fase); este material no tiene una composición única: por ser una solución, hay un rango de solubilidad. Un caso básico importante es cuando un elemento (impureza) está disuelto en el cristal (matriz) de un segundo elemento (solución binaria de dos elementos).

1.4.1 TIPOS DE ALEACIONES

Las soluciones sólidas se clasifican en sustitucionales, intersticiales y transformacionales.

SOLUCIONES SÓLIDAS SUSTITUCIONALES

En las soluciones sólidas sustitucionales, los átomos de soluto sustituyen, en términos de posición, a átomos de la matriz (solvente). Para este tipo de solubilidad los dos átomos deben ser similares en radio atómico, estructura cristalina, electro-negatividad y valencia. En las vecindades de un soluto, siempre los átomos próximos del solvente serán afectados, y habrá una distorsión local de la red. Si esta distorsión fuese muy grande, entonces la disolución podría no ser posible.



Figura 70. Los átomos del solvente están representados por las esferas azules y los átomos del soluto están representados por las esferas negras.

También podría ocurrir que se pudiese disolver sólo una cantidad limitada de soluto pues, al superar dicho nivel, ya la distorsión acumulada podría ser inaceptable para el equilibrio del sistema. En ese momento se alcanzaría el límite de solubilidad de la solución y, de seguir agregando soluto al sistema podría aparecer, coexistiendo, un segundo cristal, muy diferente de la solución sólida inicial.

La fracción de átomos de soluto que puede disolverse en un solvente de otro elemento, puede entonces variar desde una fracción de porcentaje atómico hasta el 100%.

En una solución sólida sustitucional, el arreglo de los átomos en el soluto puede ser desordenado (aleatoriamente), ordenado o agrupado.



Figura 71. Posible arreglo de los átomos en una solución sólida sustitucional. a) Aleatorio, b) Agrupado y c) Ordenado

Algunos sistemas de aleaciones exhiben una solubilidad sólida completa (por ejemplo Cu-Ni, Cd-Mg), otros muestran sólo una solubilidad limitada a cualquier temperatura.

Varios factores determinan los límites de solubilidad. Estos se expresan como una serie de normas a menudo llamadas Reglas de William Hume-Rothery.

Las siguientes condiciones favorecen una gran solubilidad sustitucional de un elemento en otro, en soluciones metálicas:

1. Los diámetros de los átomos de los elementos no deben diferir en mucho más de un 15 %, aproximadamente.

2. Las estructuras cristalinas de los dos elementos por separado tienen que ser las mismas. (Condición necesaria para que haya solubilidad total, al 100%)

3. No debe haber diferencias apreciables en electronegatividades de los dos elementos, para evitar que se formen compuestos definidos con facilidad.

4. Los dos elementos deben tener la misma valencia.

En la Tabla 21 se observa que el Ni y el Cu son bastantes similares en términos de los factores indicados. Así es como el Cu y el Ni tienen una solubilidad excepcionalmente alta: ellos presentan solubilidad total al estado sólido. La solubilidad del Zn en Cu también es bastante alta (38.3%); las estructuras CCC y HC tienen muchas similitudes. Por otra parte, el átomo de Pb es mucho mayor que el de Cu; ello explica la baja solubilidad del Pb en el Cu (0.1%). De hecho, en los policristales de Cu y sus aleaciones, el Pb segrega a los bordes de grano, debilitándolos. La solubilidad del Al en el Cu no excede del 9%, siendo la diferencia de valencia una limitación de la solubilidad. El átomo de C, que es muy pequeño, no forma soluciones sólidas sustitucionales con ningún metal. Solo otra pareja de elementos de la tabla periódica presentan, como el Cu y el Ni, una excepcional solubilidad total al estado sólido, se trata de la pareja de elementos no metálicos Si y Ge, con estructura FCC.

| Elemento | Radio Atómico (nm) | Estructura Cristalina | Electronegatividad | Valencia |
|----------|-----------------------|--------------------------|--------------------|----------|
| Cobre | 0.128 | FCC | 1.8 | +2 |
| Níquel | 0.125 | FCC | 1.8 | +2 |
| Zinc | 0.133 | HC | 1.7 | +2 |
| Aluminio | 0.143 | FCC | 1.5 | +3 |
| Plomo | 0.175 | FCC | 1.6 | +2, +4 |
| Carbono | 0.075 | HC | 2.5 | +4 |
| Silicio | 0.117 | FCC | 1.8 | +4 |
| Germanio | 0.139 | FCC | 2.0 | +4 |

Tabla 21. Datos de interés, de metales y no metales, para la solubilidad de sustitución.

SOLUCIONES SÓLIDAS INTERSTICIALES

En las soluciones sólidas intersticiales, los átomos de soluto se sitúan en los intersticios (espacios) que hay entre los átomos del solvente. Se pueden formar soluciones sólidas intersticiales solo cuando el átomo de la matriz es mucho mayor que el otro, de modo que los intersticios de la matriz sean suficientemente grandes para el tamaño del soluto.



Figura 72. En el diagrama de arriba los átomos del solvente están representados por las esferas azules y los átomos del soluto están representados por las esferas negras.

Ejemplos de átomos que, debido a su pequeño tamaño, pueden disolverse intersticialmente en cristales metálicos, son: H, C, N y O. Nótese que todos estos elementos de número atómico pequeño, son no metales. Cuando ellos se disuelven en un cristal metálico, siempre lo hacen en una concentración baja, por lo que el material sigue siendo preponderantemente de enlace metálico.

Un ejemplo importante de soluciones sólidas intersticiales son las formadas por el C disuelto intersticialmente en Fe- α (ferrita) y en Fe- γ (austenita). El radio atómico del Fe- γ es de 0,129 nm, mientras que el del C es de 0,075 nm, por lo que existe una diferencia de radios atómicos del 42%; todos estos son valores aproximados que dependen de la temperatura. Sin embargo, pese a esta diferencia, solo es posible una solubilidad intersticial máxima de 2,08% de C a 1148°C.

La Figura 73 ilustra esquemáticamente la distorsión que provocan átomos intersticiales en una matriz. El radio del mayor intersticio en el Fe- γ es de 0,053 nm. Puesto que el radio del átomo de C es de 0,075 nm, no es sorprendente que la solubilidad máxima del C en Fe- γ sea apenas de 2,08%.

Por otra parte, la fase Fe- α es menos densa que la fase Fe- γ , y la solubilidad intersticial del C es menor en la fase menos densa (Fe- γ). Sin embargo, para la solubilidad, lo que interesa es el tamaño de los intersticios específicos donde se ubicará el C y no la densidad global de la matriz. En el Fe- α , el radio del mayor intersticio es solamente de 0,036 nm, por lo que, por debajo de 723°C, apenas un 0,025% de C puede disolverse intersticialmente en el Fe.



Figura 73. La distorsión del C intersticial es menor en el cristal Fe- γ , izquierda, que en el cristal Fe- α , derecha.

Las soluciones sólidas intersticiales se forman si:

1. Un soluto es más pequeño que los intersticios de la red del solvente.

2. Un soluto tiene aproximadamente la misma electronegatividad que el solvente.

Hay muy pocos elementos que crean iones, lo suficientemente pequeños como para caber en los intersticios, por lo tanto, una alta solubilidad es rara para las soluciones sólidas intersticiales. Los iones que a menudo pueden ser solutos en soluciones sólidas intersticiales son: H, Li, Na, B.

SOLUCIONES TRANSFORMACIONALES

En este tipo de aleaciones se forma una red cristalina completamente nueva. Por lo general se producen como resultado de la formación de compuestos intermetálicos. Los compuestos intermetálicos se forman comúnmente cuando un metal (por ejemplo magnesio) tiene propiedades químicas que son fuertemente metálicas y el otro metal (por ejemplo, antimonio, estaño o bismuto) tiene propiedades químicas que son débilmente metálicas. Ejemplos de compuestos intermetálicos son Mg₂Sn, Mg₂Pb, Mg₃Sb₂ y Fe₃C Estos compuestos intermetálicos tienen un punto de fusión más alto que cualquiera de los metales base. Este punto de fusión más alto indica la alta resistencia de la unión química de los compuestos intermetálicos.

1.4.2 TEORÍA DE FORMACIÓN DE ALEACIONES

En la década de 1920, después de analizar los datos disponibles de solubilidad, Hume-Rothery encontró los factores que influyen en la formación de compuestos y el comportamiento de las aleaciones. Encontró que existe una conexión entre la solubilidad, tamaño atómico, estructura cristalina y una concentración particular de electrones de valencia en una aleación. El desarrollo de estos conceptos se conocen actualmente como las reglas de Hume-Rothery.

REGLA 1: FACTOR DEL TAMAÑO ATÓMICO

La regla de factor de tamaño atómico dice que "si los diámetros atómicos del soluto y disolvente difieren en más de 14%, es probable que la solubilidad sólida sea limitada debido a la distorsión en la red, ya que esta será demasiado grande para una solubilidad sólida sustitucional". Cuando el factor de tamaño atómico es desfavorable, este será el principal motivo por el cual la solubilidad sólida estará limitada, y cuando el factor de tamaño atómico de tamaño atómico es favorable, otros factores pueden limitar el grado de solubilidad sólida y este será de importancia secundaria.

$$Diferencia = \left(\frac{r_{soluto} - r_{solvente}}{r_{solvente}}\right) \times 100 \le 14\%$$

El concepto general se ilustra en la figura 74, en donde los intervalos de tamaños atómicos favorables con respecto al cobre, plata y hierro se resaltan en el diagrama. Si el diámetro atómico de un elemento de soluto en particular se encuentra fuera de la zona del intervalo de tamaño favorable para el disolvente, el factor de tamaño se dice que es negativo y la solubilidad sólida primaria será limitada generalmente en una cierta proporción con el aumento de la diferencia entre los dos diámetros atómicos. Dentro de la zona favorable el factor de tamaño atómico es sólo de importancia secundaria y otros factores pueden determinar la magnitud total de la solubilidad sólida.





Waber aplicó el factor de tamaño atómico a 1423 soluciones sólidas, y en un 90,31% (559/619) de los sistemas en los que se predijo baja solubilidad en estado sólido, se observó que en efecto la solubilidad era limitada. Por otra parte, fue más difícil de predecir una amplia solubilidad utilizando solo este factor, cuando había una

pequeña diferencia de tamaño atómico, solo en el 50% (403/804) de los sistemas analizados se encontró una alta solubilidad.

REGLA 2: FACTOR DE ELECTRONEGATIVIDAD

Hume-Rothery mencionan que, compuestos intermetálicos estables tienden a formarse con mayor frecuencia cuando el soluto posee una alta electronegatividad y el solvente es más electropositivo, o viceversa. Debido a que una menor energía libre se puede obtener cuando el sistema adopta una combinación de solución sólida y compuestos intermetálicos, el átomo de soluto se divide para formar el compuesto intermetálico estable en lugar de entrar en solución sólida.

La probabilidad de la formación de tales compuestos en un sistema de aleación está relacionada con la afinidad química de los elementos participantes. El principio general que conduce a una solubilidad limitada en estado sólido se ilustra en la Figura 75 usando curvas hipotéticas de energía libre de una solución sólida primaria y una fase intermedia. El ancho de la zona sombreada representa el grado de solubilidad en estado sólido, estará más limitada mientas se incrementa la estabilidad de la fase intermedia.



Figura 75. Restricción de la solubilidad en estado sólido debido a la estabilidad de una fase intermedia.

El principio anterior es conocido como el efecto electroquímico, que está relacionado con la diferencia en la electronegatividad de los dos componentes.

En algunos sistemas de aleaciones binarias, si uno de los componentes es muy electropositivo respecto al otro, habría una fuerte tendencia a formar compuestos de considerable estabilidad en el que la regla del factor relativo de valencia se cumple. Este es el efecto que más influye en la determinación de la formación de aleaciones, es el que predomina sobre los demás efectos²².

REGLA 3: FACTOR DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA

Para obtener una solubilidad sólida completa, los dos elementos deben tener el mismo tipo de estructura cristalina, es decir, ambos elementos deben tener una estructura ya sea FCC, BCC o HCP.

Sin embargo hay que tener en cuenta que los elementos pueden tener múltiples estructuras dependiendo de la temperatura y esto puede afectar la estabilidad de la aleación, un ejemplo de esto se aprecia en la tabla 22.

| Metal | Estructura Cristalina | Estructura a otra temperatura |
|-------|-----------------------|-------------------------------|
| Ca | FCC | BCC (>447°C) |
| Со | HCP | FCC (>427°C) |
| Hf | HCP | BCC (>1742°C) |
| Fe | BCC | FCC (>912°C) |
| | | BCC (>1394°C) |
| Li | BCC | BCC (<-193°C) |
| Na | BCC | BCC (<-233°C) |
| Sn | BCT | Cubic (<13°C) |
| TI | HCP | BCC (>234°C) |
| Ti | HCP | BCC (>883°C) |
| Y | НСР | BCC (>1481°C) |
| Zr | HCP | BCC (>872°C) |

Tabla 22. Lista de algunos metales alotrópicos.

REGLA 4: FACTOR RELATIVO DE VALENCIA

Esta regla indica que, un metal de valencia baja tiende a disolver mejor a un metal de valencia superior que a la inversa. Por ejemplo en el sistema de aleación aluminio-níquel, el níquel (valencia "baja") disuelve 5 por ciento de aluminio, pero el aluminio (valencia "alta") disuelve sólo 0,04 por ciento de níquel.

No obstante, una investigación más extensa no ha confirmado la generalidad de esta regla. Un ejemplo es que la plata monovalente puede disolver aproximadamente 20% de aluminio, pero el aluminio trivalente disuelve alrededor de 24% de plata. Sin embargo, para valencias mayores a uno el factor relativo de valencia predice adecuadamente la solubilidad, en el caso de compuestos de enlaces covalentes. Un ejemplo de esto es que el cobre disuelve aproximadamente 11% de silicio, pero el silicio disuelve al cobre insignificativamente. Esta regla parece ser válida sólo cuando los metales monovalentes como el cobre, plata o el oro se alean con los elementos del subgrupo B de la tabla periódica que tienen valencias mayores a uno.

Evaluaciones posteriores a Hume-Rothery, sugieren que el efecto relativo de valencia no es un principio general, y que cuando dos elementos de valencia alta son aleados, generalmente no es posible predecir cuál de los dos tendrá una mayor solubilidad con respecto al otro.

Un corolario interesante de la cuarta regla es que el número total de electrones de valencia por átomo se puede utilizar como una guía en la determinación de la estructura cristalina de la aleación. Como se resume en la Tabla 24, mediante la suma de los electrones de valencia de los elementos en la aleación y dividiendo por el número de tipos de átomos (binario = 2, ternaria = 3, etc), a veces es posible predecir la estructura cristalina de un aleación. Como un ejemplo de este corolario, la aleación binaria formada entre Cu (+1 valencia) y Be (+2 valencia) da (1 + 2) / 2 = 3/2 electrones de valencia / átomo, y resulta tener una estructura BCC, que es diferente de cualquiera de las dos estructuras de los componentes.

| | Electrones de valencia/Átomo | Estructura Cristalina |
|---|------------------------------|---------------------------|
| | 3/2 | BCC, cubica compleja, HCP |
| | 21/13 | Cubica compleja |
| | 7/4 | НСР |
| - | | |

Tabla 23. Estructuras cristalinas de aleaciones comunes basadas en los componentes de valencias.

Aunque extensas investigaciones se realizaron para elaborar la teoría de la reglas de HR, se planteó que sería muy útil si la solubilidad de los materiales se pudiera plasmar esquemáticamente en un sistema cartesiano. Así, los investigadores simplemente podrían calcular la coordenada del elemento para predecir la solubilidad usando un diagrama. Esta idea comenzó a partir de Darken y Gurry, seguido de Gschneidner, Chelikowsky, Alonso y Zhang, entre otros.

MÉTODO DE DARKEN-GURRY

En 1953, Darken y Gurry propusieron un método de diagrama para describir la solubilidad sólida de cincuenta sistemas de aleación (método DG). Ellos usaron el factor de tamaño atómico en las abscisas y el factor electroquímico (electronegatividad) como ordenadas para graficar solubilidades de cada sistema de aleación y luego dibujar una elipse ($r_{solvente} \pm 15\%$ en el eje menor, $\chi_{solvente} \pm 0,4$ en el eje de ordenadas, donde $r_{solvente}$ y $\chi_{solvente}$ son radio y electronegatividad del solvente respectivamente) para separar los elementos solubles de los elementos insolubles. El resultado se muestra en la figura 76. La solubilidad se caracteriza cualitativamente como "extensa" o "limitada", dentro de la elipse o fuera de la elipse, respectivamente. Se aplicó este método a sistemas de aleación de magnesio, aluminio y plata. El factor electroquímico se tomó como la diferencia de 0,4 ($|\chi_{solvente} - \chi_{soluto}| < 0,4$).

Este método funciona bien para los sistemas de aleación de magnesio, pero no para los sistemas de plata. La razón del éxito en los sistemas de clasificación de plata en ese momento se atribuyeron a la utilización de valores de electronegatividad no aprobadas de plata, pero Gschneidner argumentó que incluso utilizando valores aprobados de electronegatividad de plata, la clasificación aún sería deficiente.

Cuanto más cerca están dos puntos en el mapa, más probable es una alta solubilidad sólida mutua entre los elementos involucrados. Waber demostró posteriormente, en un estudio estadístico de 1455 sistemas para los cuales existen datos experimentales, que más del 75% de los sistemas obedecieron la predicción de la solubilidad en estado sólido evaluado sobre la base de un diagrama DG. La utilidad del método DG está particularmente bien demostrada por los metales actínidos y las tierras raras.



Figura 76. Diagrama Darken-Gurry con una elipse dibujada considerando al tántalo como solvente. Las dos líneas verticales son las tangentes a la elipse en los extremos del eje menor (±15% de radio del tántalo).

En resumen, se prevé una elevada solubilidad, si el átomo del soluto está dentro de la elipse (diferencias en χ <0,2 y diferencias en r<7,5%) del disolvente.

En 1980, Gschneidner aplico de nuevo el método DG para crear una clasificación de soluciones solidas soluble/insoluble al introducir el efecto de la estructura cristalina (método electrónico-estructura cristalina Darken-Gurry ECSDG). A partir de este, formuló cuatro reglas:

1) En el caso de que el disolvente y el soluto sean elementos-d, únicamente la regla del factor de tamaño atómico regulará la extensión de la región de la solución sólida, es decir, no es necesario utilizar el criterio de la estructura cristalina.

2) En los casos en que el disolvente es un elemento-d y el soluto es un elemento-sp, se aplica primero el criterio de la estructura cristalina y si las estructuras cristalinas son iguales, entonces la regla del factor de tamaño atómico se aplica para predecir si existirá solubilidad limitada o extensa.

3) En el caso en que tanto el disolvente y el soluto sean elementos-sp, el criterio de la estructura cristalina se aplicará primero, y si este factor es favorable entonces la regla del factor de tamaño atómico se aplicará para predecir una solubilidad alto en la solución sólida. Si el criterio de la estructura cristalina no es satisfecho, entonces se esperará poca o nula solubilidad.

4) En los casos en que el disolvente sea un elemento-sp y el soluto sea un elemento-d, no se puede predecir la formación de soluciones sólidas, ya que son independientes de los factores de la estructura cristalina y del tamaño atómico.

Aplicando las reglas ECSDG a diez disolventes (Mg, Al, Fe, Ge, Pd, Ag, Cd, La, W y Pb), se encontró una mejora en la predicción de la solubilidad en estado sólido en comparación con el método DG.

Más recientemente, Gschneidner y Verkade presentaron detalles completos de su método semi-empírico (Ilamado el modelo de tamaño atómico, estructura electrónica y cristalina ECS), y señalaron que su método también es muy eficaz para predecir solubilidad extendida de cualquier elemento en un compuesto binario. En los compuestos, i) la compatibilidad de la estructura cristalina del soluto con uno o ambos componentes de la fase intermetálica se considera como un factor crítico; ii) la valencia del soluto en comparación con la de los componentes es también decisiva iii) si estos dos criterios son favorables, entonces el factor de tamaño atómico será el decisivo, y debido a la naturaleza menos elástica en comparación con compuestos de metales elementales, se debe aplicar una limitación de ± 10% en el tamaño atómico.

MÉTODO DE CHELIKOWSKY

En 1979, Chelikowsky introdujo un procedimiento gráfico similar al método de Darken-Gurry para analizar la solubilidad sólida en el caso de huéspedes divalentes. En su diagrama, introdujo un par de coordenadas diferentes: la densidad de electrones en el límite de las celdas atómicas (n_{ws}) y la electronegatividad (ϕ^*).

En su diagrama, Chelikowsky fue capaz de dar predicciones más fiables. Un ejemplo del diagrama de Chelikowsky y una comparación con el diagrama de Darken-Gurry se muestran en la Figura 77.





Figura 77. (a) Diagrama de Darken-Gurry con el Mg como metal principal. (b) Diagrama de Chelikowsky con el Mg como metal principal.

En la figura 77 (b), la mayoría de los metales que son solubles en un huésped determinado son limitados por la elipse. Comparando el método de Chelikowsky con el de Darken-Gurry, ambos tienen una coordenada en común, la electronegatividad. En el diagrama de Darken-Gurry, la electronegatividad utilizada es la de la escala de Pauling, mientras que en los diagramas de Chelikowsky se utiliza la escala de Miedema. Ambas escalas tienen en realidad una buena correlación. La otra coordenada que es diferente, es el tamaño atómico el cual se utiliza en el diagrama de Darken-Gurry la densidad de electrones en el límite de las celdas atómicas se utiliza en el método de Chelikowsky. Aunque se ha establecido una mayor precisión con este método, siguen habiendo algunas excepciones. Estas excepciones indican que el método de Chelikowsky sigue siendo susceptible a alguna mejora²³.

1.4.3 ALEANTES PRINCIPALES EN LAS ALEACIONES 380 Y AlSi9Cu3

El sistema ternario Al-Si-Cu representa el mayor volumen de aleaciones de aluminio utilizadas por la industria de la fundición a presión. La aleación más popular en este sistema es la aleación 380. Esta combina lo mejor de ambas aleaciones binarias Al-Cu y Al-Si, ya que el cobre por sí solo no le da la capacidad al aluminio para que pueda ser colado a presión, pero en combinación con el silicio, mejora la resistencia de las aleaciones Al-Si coladas a presión. Otros elementos de aleación presentes en cantidades relativamente considerables son el hierro, zinc, magnesio y manganeso. Cada uno de estos elementos confiere una propiedad particular a la aleación: el cobre mejora la dureza y las propiedades a temperaturas elevadas, el magnesio provoca que la

aleación sea resistente, dura y sensible al tratamiento térmico, el hierro da resistencia y también evita la adherencia a los moldes de acero (soldadura a presión), mientras que el manganeso dependiendo de la cantidad, el contenido de hierro y la velocidad de enfriamiento puede llegar a ser beneficioso o perjudicial. Las impurezas y los elementos de aleación en parte entran en solución sólida en la matriz y en parte forman compuestos intermetálicos durante la solidificación del metal.

Las propiedades de las aleaciones 380 están determinadas por la finura de la microestructura y la distribución de las fases. Los dos factores principales que afectan a estas son la velocidad de solidificación y la composición de la aleación. La velocidad de solidificación de la aleación controla la finura de la estructura y se rige por el proceso de colada utilizado, es decir, arena, molde permanente, colada a presión, etc. La forma y distribución de las fases está controlada por la concentración de los elementos aleantes principales y las impurezas presentes. Una variación de la composición dentro de la especificación puede tener un efecto significativo en la microestructura y, por lo tanto, las propiedades. Además, la secuencia de solidificación está influenciada en gran medida por la interacción de los elementos de aleación tales como hierro, silicio, manganeso, cobre, zinc, y magnesio.

La presencia de una gran cantidad de elementos aleantes en las aleaciones 380 complica el proceso de solidificación, y hay una necesidad de entender el rol de cada elemento aleante de cómo afecta a las propiedades y la interrelación entre estos para conseguir las propiedades óptimas.

A continuación se presenta los intervalos de composición química de la aleación 380 base aluminio.

| Límite | Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mn (%) | Mg (%) | Ni (%) | Zn (%) | Sn (%) | AI (%) |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mínimo | 7.5 | - | 3.0 | - | - | - | - | - | Decto |
| Máximo | 9.5 | 2.0 | 4.0 | 0.50 | 0.10 | 0.50 | 3.0 | 0.35 | Resto |

Tabla 24. Composición química de la aleación 380 base aluminio.

Por otro lado, la aleación AlSi9Cu3 es una aleación tratable térmicamente con una buena colabilidad. Este tipo de aleaciones contienen normalmente cobre, silicio y magnesio como los principales elementos de aleación, junto con otros elementos aleantes o impurezas, tales como Fe, Mn o Cr. El cobre en la aleación AlSi9Cu3 reduce la resistencia a la corrosión y mejora las propiedades mecánicas. Un proceso de enfriamiento controlado y/o de aleación óptima con Ce hace que sea posible lograr propiedades mecánicas adecuadas, como la resistencia a la tracción y dureza.

Una pequeña cantidad de Mg provoca la formación de la fase de Mg₂Si y además, aumenta las propiedades mecánicas en las aleaciones Al-Si-Cu. La microestructura de las aleaciones Al-Si determinan las propiedades mecánicas de las piezas de fundición. Por esta razón una microestructura específica y propiedades mecánicas deben de ser logradas. Esto puede se puede conseguir con un tamaño de grano más pequeño y con una modificación del eutéctico ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) y/o con altas velocidades de enfriamiento las cuales se pueden lograr en el proceso de colada a presión. En la siguiente tabla se enlista la composición química de la aleación AlSi9Cu3.

| Tabla 25. | Composición | química de | e la aleac | ión AlSi9Cu3. |
|-----------|-------------|------------|------------|---------------|
|-----------|-------------|------------|------------|---------------|

| Límite | Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mn (%) | Mg (%) | Ni (%) | Zn (%) | Sn (%) | AI (%) |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mínimo | 8.0 | - | 2.0 | 0.10 | 0.10 | - | - | - | Deste |
| Máximo | 11.0 | 1.2 | 3.5 | 0.50 | 0.50 | 0.30 | 1.2 | 0.1 | Resto |

1.4.4 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS ALEACIONES TRATADAS

La aleación 380 es por mucho la más utilizada en la fundición, ya que ofrece la mejor combinación de propiedades de otros materiales y una facilidad de producción. Es posible utilizarla en una gran cantidad de productos al igual que la aleación AlSi9Cu3. Algunos de los usos de estas aleaciones incluyen equipos electrónicos y de comunicaciones, componentes automotrices, soportes de motor, transmisión y cajas de engranajes, electrodomésticos, carcasas de cortadoras de césped, componentes para muebles, herramientas manuales y eléctricas.

A continuación se enlistan las propiedades físicas y mecánicas de ambas aleaciones.

| Aleación | Densidad (kg/m³) | Temperatura de Fusión (°C) | Conductividad Eléctrica (MS/m) | Conductividad Térmica a 25°C (W/m K) | Coeficiente de expansión Térmica (10 ⁻⁴ /°C) |
|----------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| 380 | 2740 | 520-590 | 27 | 96.2 | 21.2 |
| AlSi9Cu3 | 2760 | 490-600 | 29 | 105 | 22.0 |

Tabla 26. Propiedades físicas de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3^{24,25}

| Tabla 27. Flupieuaues illecatilicas de las aleaciones 500 y Albigcus | Tabla 27. Pro | piedades mecánica | s de las aleaciones | 380 y | AlSi9Cu3 | 24,25 |
|--|---------------|-------------------|---------------------|-------|----------|-------|
|--|---------------|-------------------|---------------------|-------|----------|-------|

| Aleación | Resistencia a la Tensión (MPa) | Esfuerzo de Cedencia (MPA) | Elongación (%) | Dureza (BHN) | Módulo de Young (GPA) |
|----------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|
| 380 | 320 | 160 | 3.5 | 80 | 71 |
| AlSi9Cu3 | 310 | 140 | 3.0 | 80 | 75 |

1.4.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS ALEANTES

Como se mencionó anteriormente es fundamental conocer las propiedades de los elementos aleantes para conocer el tipo de interacción que tendrán con el metal base de la aleación, es decir, si estos tendrán cierta afinidad entre ellos para formar compuestos intermetálicos, sí serán fáciles de disolver en el aluminio y que tan propensos son a oxidarse. En las Tablas 28 y 29 se muestran las propiedades físicas y químicas de los aleantes principales de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3.

Tabla 28. Propiedades atómicas de los principales elementos aleantes de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3.

| Elemento | Radio Atómico (Å) | Electronegatividad (Pauling) | Valencia | Bloque |
|----------|----------------------|---------------------------------|----------------|--------|
| Si | 1.17 | 1.90 | -4 | р |
| Fe | 1.12 | 1.83 | +2, +3 | d |
| Cu | 1.28 | 1.90 | +1, +2, +3, +4 | d |
| Mg | 1.60 | 1.31 | +2 | S |
| Zn | 1.33 | 1.65 | +2 | d |

Tabla 29. Propiedades físicas de los principales elementos aleantes de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3.

| Elemento | Densidad (kg/m³) | Punto de Fusión (°C) | Conductividad Térmica (W/m K) | Ср (Ј/Кg К) | ∆ <i>G</i> ⁶⁵⁰ del óxido (kcal) | Estructura Cristalina |
|----------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------|--|--------------------------|
| Si | 2330 | 1414 | 148 | 700 | -173 | diamante |
| Fe | 7874 | 1535 | 80 | 440 | -98 | bcc |
| Cu | 8960 | 1084 | 400 | 385 | -52 | fcc |
| Mg | 1738 | 650 | 156 | 1020 | -250 | hcp |
| Zn | 7140 | 420 | 116 | 390 | -128 | hcp |

1.4.6 EFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

Cuando el contenido del elemento aleante excede el límite de solubilidad sólida, el elemento de aleación produce "segundas fases", constituyentes microestructurales que pueden consistir bien en el elemento de aleación puro o en un compuesto intermetálico. Los elementos que generalmente forman constituyentes microestructurales puros son el silicio, estaño y berilio. Sin embargo, si la aleación es una aleación ternaria o de orden superior, el silicio o el estaño pueden formar compuestos intermetálicos. La mayoría de los otros elementos aleantes forman compuestos con el aluminio en aleaciones binarias y fases más complejas en aleaciones ternarias o de orden superior.

El manganeso y el cromo se incluyen en el grupo de elementos que forman predominantemente segundas fases constituyentes, ya que en las aleaciones comerciales tienen solubilidades muy bajas. En las aleaciones de aluminio que contienen manganeso, y además contienen hierro y silicio, estos elementos forman una fase cuaternaria Al₁₂(Fe,Mn)₃Si. En las aleaciones que contienen cobre y manganeso, se forma la fase ternaria Al₂₀Cu₂Mn₃. En la mayoría de las aleaciones en las que el cromo está presente también contienen magnesio, de modo que se forma el Al₁₂Mg₂Cr, que tiene una solubilidad sólida muy baja.

La amplia variedad de fases intermetálicas en las aleaciones de aluminio, se producen porque el aluminio es muy electronegativo y trivalente. Los detalles dependen de las proporciones y cantidades totales de los elementos aleantes presentes y se requiere de los diagramas de fase para su predicción. Sin embargo se debe tener en cuenta, que las condiciones metaestables frecuentemente prevalecen y se caracterizan por la presencia de fases que no se muestran en los diagramas de equilibrio.

A continuación se resume la formación de fases, intermetálicos y el efecto de los principales elementos aleantes en las aleaciones 380 y AlSi9Cu3 base aluminio.

SILICIO

El silicio es el principal elemento aleantes en las aleaciones 380 y AlSi9Cu3. El silicio forma un eutéctico con el aluminio a 11,7% de Si y 577°C. La adición de silicio mejora las características de la aleación incrementando la fluidez, la alimentación y la resistencia a la rotura en caliente. Además la dureza de la aleación se incrementa con el contenido de Si pero se reduce la ductilidad y la maquinabilidad.

Las aleaciones eutécticas tienen la más alta fluidez para una temperatura de colada dada y tienen un intervalo corto de solidificación. Las aleaciones hiper-eutécticas son difíciles de mecanizar, se utilizan para aplicaciones resistentes al desgaste, tales como pistones. Para refinar mejor de silicio primario en las aleaciones hiper-eutécticas, se utiliza a menudo fosforo.

HIERRO

Una impureza que está casi siempre presente en el aluminio es el hierro. Se obtiene fácilmente de las ollas, cucharones, hornos e inserciones que están en contacto con el aluminio fundido. La solubilidad del hierro y otros elementos de aleación en el aluminio es muy baja. Como resultado de esto, durante la solidificación, el líquido de las regiones interdendríticas se enriquece de elementos de aleación, y el hierro forma complejos compuestos intermetálicos con el aluminio, silicio, manganeso y cromo. Se trata de complejos insolubles y su porcentaje en volumen aumenta si el contenido de hierro es elevado.

Cuando el complejo de hierro tiene forma de agujas alargadas (fase β , Al₅FeSi), provoca que la aleación se vuelva frágil y debilita las propiedades mecánicas. La forma de escritura china (fase α , Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂), es relativamente menos nociva. En procesos de colada en molde de arena y permanente, se observa la formación de agujas alargadas bajo las condiciones de colada, por esto se especifica un nivel de hierro en un valor por debajo del 0,5%.

El tamaño y forma de las fases de hierro puede ser controladas por la disminución de la cantidad de hierro, mediante el aumento de la velocidad de enfriamiento o mediante la adición de una cantidad apropiada de neutralizadores como manganeso, cromo y cobalto.

Por diversas razones, en las aleaciones de fundición a presión, es tolerado un mayor porcentaje de hierro. Debido a las altas velocidades de enfriamiento que prevalecen en el proceso de fundición a presión, los compuestos de hierro son refinados y existen en forma de agujas finas. De hecho, un contenido de hierro en las aleaciones 380 y AlSi9Cu3 (aleaciones de fundición a presión) de hasta 1,3% se es benéfico ya que mejora la resistencia, dureza y la fragilidad en caliente. Otra razón importante para permitir un mayor nivel de hierro es que reduce la tendencia del metal a soldarse con la superficie del molde. Sin embargo, el nivel de hierro no se puede aumentar libremente para aprovechar estos beneficios.

La Figura 78 (a) y (b) muestran las curvas de enfriamiento obtenidas de una aleación de aluminio que contiene hierro. Se observa en las curvas de enfriamiento que el hierro cambia el comportamiento de la solidificación,

en particular en la región pre-eutéctica. A medida que el contenido de hierro aumenta, se aprecia una protuberancia doble en las curvas. Las fases de hierro comienzan a formarse por debajo de la temperatura liquidus, y conjuntamente se da la solidificación de la fase primaria lo cual origina esta segunda protuberancia. Además se observa en las curvas que las temperaturas liquidus y eutéctica se incrementan cuando se aumenta la cantidad de hierro.



Figura 78. Curvas de enfriamiento de una aleación de aluminio con diferentes contenidos de hierro: (a) 0,4°C/s y (b) 10°C/s

MANGANESO

Una pequeña cantidad de manganeso está siempre presente en las aleaciones de aluminio. En las aleaciones Al-Si, el manganeso se añade a menudo específicamente para controlar la morfología de los precipitados de hierro que se forman durante la solidificación. Cuando el contenido de hierro excede el 0,45% en piezas coladas en molde de arena o molde permanente, como regla general, la proporción de hierro con respeto al manganeso se mantiene 2: 1.

El manganeso siempre mantiene la relación con el hierro en las aleaciones de fundición a presión, donde se combina con el hierro y el cromo formando un lodo. Este lodo es perjudicial, ya que es duro y abrasivo. En las aleaciones 380, el cromo está presente en una concentración pequeña y el hierro es necesario mantenerlo alrededor de 1,0 a 1,3%, por lo tanto sólo el nivel de manganeso puede ajustarse para que se tenga un factor de lodos permisible (SF) de 1,8, donde el SF de define como:

$$SF = x\% Fe + 2x\% Mn + 3x\% Cr$$

Esta fórmula, comúnmente se conoce como la regla 123 (hierro: manganeso: cromo), es sólo una guía y pueden variar dependiendo del productor. La formación de los lodos es también una función de la temperatura de mantenimiento. Cuando se forman los lodos en el metal líquido, tiende a sedimentarse al fondo del crisol ya que su densidad es más alta que la del aluminio líquido, particularmente cuando se mantiene durante mucho tiempo. Gobrecht realizó experimentos con las aleaciones 380 donde varió el contenido de hierro, manganeso y cromo y relacionado el factor SF con la temperatura de mantenimiento. Se mostró que existe una temperatura crítica por debajo de la cual la sedimentación (formación de lodos y depósitos en el fondo) se produce. La figura 79 muestra estos resultados. Al conservar la temperatura de mantenimiento por encima de la temperatura crítica o un baño agitado, un factor de lodos superior a 1,8 puede ser tolerado.



Figura 79. Diagrama de fases simplificado para una aleación 380 que muestra la región en la que se espera que se forme el lodo Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂.

La fase hierro- α que se forma durante la solidificación y el lodo que se forma durante el periodo de mantenimiento tienen la misma fórmula química, Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂, pero varían en su morfología.

MAGNESIO

La cantidad permitida de magnesio en la especificación de América del Norte es de 0,1% máximo, mientras que las especificaciones europeas permiten 0,3% máximo. Dado que la mayoría de las aleaciones de fundición a presión se producen a partir de fuentes secundarias (chatarra), estas contienen un mayor porcentaje de magnesio, y se convierte en una carga pesada en la fundición secundaria al querer eliminar el exceso de magnesio. A pesar de que el magnesio se puede eliminar fácilmente haciendo pasar cloro o algún halógeno por el aluminio líquido, el proceso no es ecológico y requiere otros gastos generales para manejar los contaminantes.

El contenido de magnesio de hasta 0,30% no afecta el comportamiento de solidificación en la aleación. Sin embargo, la temperatura eutéctica cambia aproximadamente 1°C por cada 0,10% de magnesio añadido.

A medida que el nivel de magnesio se incrementa, la cantidad de fase α presente en la microestructura va aumentando, y las agujas se vuelven gruesas y cortas.

En resumen, el magnesio, ayuda a mejorar la resistencia de las aleaciones, pero a costa de reducir la ductilidad.

COBRE

La adición de cobre a las aleaciones binarias Al-Si mejora la resistencia de las piezas e incremente la fluidez. El cobre en estas aleaciones está presente como Al₂Cu o como un precipitado complejo de aluminio, magnesio y silicio. El complejo final que está presente en la microestructura depende del porcentaje de estos elementos, además del cobre.

El contenido de cobre por arriba de 3.2% disminuye el punto de fusión de la aleación considerablemente y la temperatura eutéctica, sin embargo, la temperatura de formación de la fase Al₂Cu, se incrementa.

Además a medida que el contenido de cobre se incrementa, el tamaño de los precipitados disminuye y los cristales primarios de silicio se dispersan. A un contenido de cobre de 4,09% una nueva fase de cobre se forma.

Un aumento en el nivel de cobre y magnesio aumenta la fluidez ligeramente, sin embargo el hierro la reduce.

ZINC

El zinc tiene una solubilidad relativamente alta en el aluminio, tanto a temperaturas altas como a temperatura ambiente. Se sabe que un contenido de hasta 3,0% de zinc, no tiene ningún efecto relevante sobre las propiedades de las aleaciones Al-Si. La función del zinc en las aleaciones no es muy clara, se cree que puede mejorar las propiedades a altas temperaturas, además de la maquinabilidad. Durante la solidificación, el zinc entra sucesivamente en solución sólida, y por lo tanto altera sólo la región liquidus. Las curvas de enfriamiento muestran que el zinc disminuye el punto de fusión. La temperatura eutéctica no se ve muy afectada por los diferentes niveles de zinc.

La fluidez se reduce cuando zinc se incrementa, además la temperatura de precipitación de los complejos de cobre se desplaza, y esto se debe a que el zinc tiene alguna solubilidad en estos complejos (alrededor de 4%). Los complejos de cobre formados tienen una morfología más esferoidal cuando se incrementa el zinc²⁶.

1.5 OXIDACIÓN Y GENERACIÓN DE ESCORIA

Los hornos utilizados para la fusión de aluminio reciclado generan tres productos. El primero es el aluminio fundido. El segundo son los gases de salida. Y el tercero es un semisólido resultante de la nata que se forma en la superficie del metal fundido. Esta nata, mejor conocida como la escoria, es una mezcla de metal de aluminio

fundido, varios compuestos de óxido y cloruro. Su composición depende del tipo de fusión, la cantidad y composición de los fundentes utilizados.

1.5.1 OXIDACIÓN DEL ALUMINIO

El aluminio se oxida para formar Al_2O_3 una vez que entra en contacto con el oxígeno, incluso a presiones parciales muy bajas de oxígeno. A temperatura ambiente la capa de óxido tiene un espesor máximo de 2 a 3 nm, dicha capa se forma en tan solo un día. Y es esta capa de óxido la que impide que el oxígeno difunda hacia el interior del metal. Esta propiedad "anticorrosiva" hace al aluminio un material muy útil.

 $\begin{array}{c} 4Al+3O_2\rightarrow 2Al_2O_3\\ 2Al+N_2\rightarrow 2AlN\\ 2Al+3H_2O\rightarrow Al_2O_3+3H_2\\ 6Al+3CO\rightarrow Al_4C_3+Al_2O_3\\ 4Al+3SiO_2\rightarrow 2Al_2O_3+3Si \end{array}$

Sin embargo por arriba de los 450°C la resistencia a la corrosión del aluminio disminuye, y la capa de oxígeno crece diez veces más que la formada temperatura ambiente.

Uno de los elementos aleantes más importantes del aluminio es el magnesio. El óxido de magnesio (MgO) no forma una capa pasiva, por lo que el magnesio se oxida más fácilmente que el aluminio. La presencia de magnesio en el aluminio favorece significativamente la oxidación a altas temperaturas, además de que la oxidación aumenta a más bajas temperaturas por la presencia del magnesio. Otros elementos aleantes también cambian la velocidad de oxidación.

Además, debido al movimiento del baño líquido la película de óxido se agrieta y queda expuesto el aluminio que estaba protegido por la capa de escoria y aumenta la cantidad generada de escoria. Adicionalmente, las reacciones químicas aumentan su velocidad de reacción a altas temperaturas lo que incrementa la oxidación aún más.

Existen diferentes maneras de proteger al metal líquido de la oxidación. Una atmosfera en el interior del horno con un contenido de 65% de dióxido de carbono disminuye el proceso de oxidación considerablemente.

1.5.2 GENERACIÓN DE ESCORIA

El termino escoria se define como "un producto de desecho retirado del metal fundido durante la fusión, esencialmente de carácter metálico".

En el proceso de refusión de chatarra de aluminio, la escoria puede constar de restos de pintura, laca, materiales de combustibles, además de contener probablemente gases atrapados, óxidos de metal y grandes cantidades de metal no oxidado. Típicamente de un 70 a 90% de la escoria es formada a partir de aluminio.

La generación de escoria constituye un gran problema para la industria de aluminio secundario, ya que representa pérdidas de metal que pueden superar el 10% para algunos tipos de materiales. Cabe señalar que la
mayoría de las mediciones de pérdidas de metal se realizan en hornos industriales en funcionamiento. La práctica de carga, desescoriado y el enfriamiento de la escoria puede variar mucho, según las condiciones experimentales. Aunque estos factores son importantes para las pérdidas de metal, a menudo no están bien documentadas en la literatura, posiblemente por las consideraciones de confidencialidad.

La cantidad de óxido en la superficie de la chatarra cargada durante la fusión es insignificante en comparación con el nivel de pérdida de metal experimentado. Esto puede ser ilustrado por una simple estimación con una capa de óxido de 20nm (por ejemplo de una aleación de Al-Mg 0,8% después de una hora a 580°C). En ambos lados de una placa de aluminio incluso si la placa es muy delgada, digamos 0,1 mm, la fracción de óxido representaría sólo un 0,06% del total de la placa.

Algunos de los mayores problemas de generación de escoria están ligados a la refusión de chatarra ligera, porque este tiene una gran área superficial y un bajo volumen. Además, puesto que las piezas de esta chatarra son pequeñas, incluso capas finas de óxido pueden ser capaces de atrapar metal debido a los efectos de tensión superficial. Se ha encontrado que la pérdida de metal aumenta significativamente cuando el espesor de las piezas decrece, para piezas gruesas de 0,2 m de espesor se tiene una perdida menor al 1% y de 5 a 18% para piezas mil veces más delgadas, dependiendo de la temperatura y la composición de la aleación.

La agitación puede romper la capa de óxido formada en la superficie del metal fundido y exponer al metal no oxidado a la atmósfera. Se ha encontrado en experimentos que se tienen pérdidas de 2 a 3% al fundir aluminio sin agitar, esta cantidad se duplica cuando se agita el baño líquido debido al gas utilizado en la desgasificación ya sea usando argón o nitrógeno. Se obtienen resultados similares cuando se coloca una bomba electromagnética para agitar. La velocidad de fusión y la generación de escoria se registraron antes y después de la instalación. La secuencia de carga no se cambió. Se consiguió una mayor velocidad de fusión, pero la generación de escoria también se incrementa.

La agitación puede contribuir a romper las películas de óxido, dando como resultado la coalescencia de las gotas atrapadas de metal fundido. Además, la inmersión de la chatarra por agitación reduce la oxidación y por lo tanto la generación de escoria.

Es discutible si algo de escoria debe conservarse en la parte superior del baño líquido para proteger al metal de una oxidación adicional. Una superficie brillante, es decir, muy poca escoria presente, puede ocasionar que gran parte de la radiación de las paredes del horno sea reflejada por el baño metálico, por lo que una capa de escoria es probablemente deseable. Sin embargo, una capa de escoria gruesa inhibe la conducción del calor. La capa de escoria también puede impedir que la chatarra penetre en el metal fundido. Una vez que penetra, la escoria puede adherirse a la chatarra y probablemente reducir la transferencia de calor entre el aluminio líquido y la chatarra. Además, la inmersión de la escoria bien puede resultar en atrapamiento adicional de aluminio metálico.

Otra forma de reducir la formación de escoria es el uso de sales fundentes. Esto sirve para tres propósitos: se proporciona una cubierta protectora sobre el aluminio fundido, se libera el metal atrapado en el óxido y se retiene el óxido en la capa de escoria. Sin embargo, el contenido resultante de sales fundentes en la escoria es perjudicial para el medio ambiente. Además, las sales pueden generar inclusiones en el aluminio.

Por supuesto es posible recuperar el aluminio metálico de la escoria después de que se desescoria el aluminio fundido. Esto puede llevarse a cabo en dos etapas. Justo después del desescoriado, la escoria está caliente y

puede ser presionada o centrifugada para separar el aluminio metálico de la escoria. Después de que la escoria se enfría, el metal puede ser recuperado en una refusión y usando sales fundentes para liberar el metal de la escoria, o con el uso de un horno de plasma. Si la escoria no se enfría rápidamente, la oxidación continuará después del desescoriado y habrá menos aluminio metálico para recuperarse en la segunda etapa. Naturalmente, es de mayor beneficio económico para el fundidor reducir la generación de escoria durante la fundición que recuperar después el metal de la escoria, a pesar de que la recuperación directa después del desescoriado puede ser muy eficiente también.

En resumen, la causa básica para la generación de escoria es la oxidación. Aparte del uso indeseable de sales fundentes, la forma más eficaz para reducir la oxidación es la inmersión rápida de la chatarra en el metal fundido²¹.

1.5.3 TIPOS DE ESCORIAS

La escoria de la capa superior tiene características diferentes que la de la parte inferior. Los términos escoria seca y húmeda se utilizan para distinguir la escoria que contiene mucho óxido y poco aluminio metálico (comúnmente la capa de la parte superior) de la escoria con alto contenido metálico (la capa de la parte inferior de la escoria), respectivamente.

La interface entre la escoria y el aluminio metálico es difícil de definir con exactitud debido a estos cambios graduales en la escoria. Después de enfriarse, la escoria seca es oscura y granular mientras que la escoria húmeda es de color gris clara y compacta.

En general, las escorias se clasifican en dos categorías: escorias no salinas y escorias salinas.

Las escorias no salinas (llamadas escorias blancas o grises en los Estados Unidos y en Europa escorias negras) se producen en las instalaciones de fusión que funden sin uso de flux. Estas incluyen todos los hornos eléctricos, hornos de reverbero de fusión de chatarra voluminosa o lingote y los hornos utilizados para el holding del aluminio primario. Puede ser generada de diferentes maneras.

-Durante la transferencia del metal fundido, cuando la capa de óxido sobre la superficie de metal líquido se rompe, dejando al descubierto la superficie de nuevo y generando más óxido.

-Durante la fundición y el mantenimiento, cuando las formas de la piel de óxido sobre la superficie del material fundido. Alto punto de fusión de pérdidas tipos de chatarra a menudo tienen óxido superficial presente antes de que comience a derretirse, y como consecuencia generar más escoria en esta etapa del proceso de reciclado.

-Durante el procesamiento de metal fundido y la refinación, cuando la agitación y perturbación de la superficie crean una superficie nueva para la oxidación.

-Como resultado de los derrames de metal. Estos no son escorias por sí mismas, pero a menudo se añaden a la escoria recuperada de la superficie del material fundido para la refundición.

Las escorias no salinas normalmente tiene un color gris claro. Se componen casi en su totalidad de Al_2O_3 y de aluminio atrapado por la tensión superficial de la película de óxido. (Debido a la cantidad de aluminio fundido

que contienen, estas escorias se denominan a veces "húmedas".) El contenido de metal puede variar de 15 a 80%, dependiendo de la técnica de fusión. Pequeñas cantidades de carburo de aluminio (Al₄C₃) y nitruro de aluminio (AlN) también están presentes frecuentemente, causados por las reacciones que se producen sobre todo después que la escoria se ha retirado del horno. Las escorias de los hornos de fundición primaria, también pueden contener pequeños niveles de criolita (Na₃AlF₆). Si la aleación a fundida contiene magnesio, la escoria también contendrá algo de periclasa (MgO) y espinela (MgAl₂O₄). El magnesio se oxida antes que el aluminio durante la refusión y por lo tanto está presente en las mayores fracciones de la escoria que en la aleación original.

Las escorias salinas se producen cuando se emplean sales para cubrir el material fundido. La sal fundida previene la oxidación del aluminio y permite separar fácilmente los óxidos metálicos del aluminio líquido. Su objetivo es reducir las pérdidas de metal mediante la ruptura de la película de óxido, liberando de este modo al metal atrapado en el interior. Como resultado de esto, la escoria salina generalmente contiene menos de 20% de aluminio metálico y de 30 a 50% de óxido de aluminio, y el resto es la sal fundente (principalmente cloruro de sodio y cloruro de potasio)¹⁷.



Figura 80. Diferentes tipos de escorias de aluminio.

> CAPÍTULO 2. CASO DE ESTUDIO. PLANTEAMIENTO

Gran parte del trabajo experimental de esta tesis fue realizado en las instalaciones de la planta de reciclado Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V. dedicada a la producción de aleaciones secundarias base aluminio, principalmente las aleaciones 380 y AlSi9Cu3, con el propósito de realizar un estudio cinético y termodinámico del proceso de aleación.

La planta Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V., proporciono muestras de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3 para realizar un estudio en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM con el fin de determinar la temperatura de inicio y la temperatura final de solidificación de estas aleaciones, utilizando curvas de enfriamiento generadas a través de análisis térmicos. Además de permitir la realización de estancias en la planta con el fin de documentar, analizar y mejorar el proceso de aleación.

La chatarra de aluminio utilizada en esta empresa es muy diversa, generalmente se realizan mezclas de chatarra de fundición y chatarra de conformado, los porcentajes que se utilizan de estas, varían dependiendo del tipo de aleación que se quiera fabricar.

2.1 CHATARRAS TÍPICAS UTILIZADAS EN LA EMPRESA

2.1.1 CHATARRAS DE CONFORMADO

Las piezas de aleaciones de conformado y de fundición más comunes utilizadas en la planta se muestran en la tabla 30 y 31, respectivamente:

| | | | Composición Química | | | | | | |
|----------------------|----------|------|---------------------|------------|-----------|-----------|------|--|--|
| Pieza | Aleación | %Si | %Fe | %Cu | %Mn | %Mg | %Zn | | |
| Radiador | 3003 | 0,33 | 0,69 | 0,12 | 1,45 | 0,01 | 0,08 | | |
| Litografía | 1325 | 0,01 | 0,30 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,1 | | |
| Papel Aluminio | 8079 | 0,05 | 0,70-1,3 | 0,05 | - | - | - | | |
| Ollas | 3003 | 0,6 | 0,7 | 0,05 - 0,2 | 1,0 - 1,5 | - | 0,1 | | |
| Perfil sin pintar | 6063 | 0,40 | 0,30 | 0,02 | 0,07 | 0,60 | 0,02 | | |
| Lamina para auto | 2036 | 0,5 | 0,5 | 2,2 - 3,0 | 0,1 - 0,4 | 0,3 - 0,6 | 0,25 | | |
| Marco de ventana | 5657 | 0,08 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | 0,8 - 1,4 | 4,5 | | |
| Cable | 1035 | 0,35 | 0,6 | 0,10 | 0,05 | 0,05 | 0,1 | | |

Tabla 30. Análisis químicos realizados en la planta a través del espectrómetro de emisión atómica.

2.1.2 CHATARRAS DE FUNDICIÓN

| Nombro | Aleggián | Composición Química | | | | | | |
|------------------------------------|----------|---------------------|-----|-----------|------|-----|------|--|
| Nombre | Aleacion | %Si | %Fe | %Cu | %Mn | %Mg | %Zn | |
| Rin | A356.0 | 6,8 | 0,2 | 0,02 | 0,01 | 0,4 | 0,01 | |
| Múltiple de admisión | 384.0 | 1,05 - 2,0 | 1,3 | 3,0 - 4,5 | 0,5 | 0,1 | 3,0 | |
| Transmisión | 332.0 | 8,5 - 10,5 | 1,2 | 2,0 - 4,0 | 0,5 | 1,5 | 1,0 | |
| Cuerpo de válvula de tractor | 380.0 | 8,5 - 9,5 | 1,0 | 2,0 - 4,0 | 0,5 | 0,3 | 2,9 | |
| Cuerpo de válvula | 360.0 | 9,0-10,0 | 2,0 | 0,6 | 0,35 | 0,5 | 0.5 | |
| Cabeza de motor | 380.0 | 8,5 - 9,5 | 1,0 | 2,0 - 4,0 | 0,5 | 0,3 | 2,9 | |
| Pistón | 332.0 | 8,5 - 10,5 | 1,2 | 2,0 - 4,0 | 0,5 | 1,5 | 1,0 | |
| Base de estéreo | 413.0 | 11,0 -13,0 | 2,0 | 1,0 | 0,35 | 0,1 | 0,5 | |
| Tapa Carburador | 319.0 | 5,5 - 6,5 | 1,0 | 2,0 - 4,0 | 0,5 | 0,1 | 1,0 | |
| Carcasa de lámpara | 413.0 | 11,0 - 13,0 | 2,0 | 1,0 | 0,35 | 0,1 | 0,5 | |
| Suela de plancha | 413.0 | 11,0 - 13,0 | 2,0 | 1,0 | 0,35 | 0,1 | 0,5 | |

Tabla 31. Análisis químicos realizados en la planta a través del espectrómetro de emisión atómica.

2.2 TÉCNICA DE FUSIÓN

El horno utilizado en Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V. para llevar acabo la fusión de la chatarra de aluminio, es el siguiente:

Horno de Reverbero Cilíndrico Basculante con Cámara de Exudado



Figura 81. Horno de reverbero cilíndrico basculante utilizado en Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.



Figura 82. Esquema de las partes del horno de reverbero cilíndrico basculante.

Este horno cuanta con las siguientes características:

Dos Quemadores de 2500 MBtu/hr Temperatura de Operación: Mínima 680°C y Máxima 750°C Capacidad: 6500 kgs Combustible: Gas L.P.

2.2.1 SECUENCIA DE CARGA

La secuencia de carga que utilizan en Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V. consiste en cargar al horno primeramente toda la chatarra de fundición en dos etapas, una vez que la chatarra de fundición ha sido cargada y fundida se procede a cargar la chatarra de conformado en varios pasos, después de que toda la chatarra esta fundida se procede a tomar una muestra del metal líquido para realizarle un análisis en el espectrómetro de emisión atómica, dependiendo del resultado se decide la cantidad de silicio y cobre que hay que añadirle a la aleación para que esta tenga la composición química solicitada por el cliente. A continuación se presenta la secuencia de carga de manera más detallada:

- 1. Se cargan 4 tolvas de chatarra de fundición, aproximadamente 2300 kg (30 min).
- 2. Utilizando el montacargas se desplaza la chatarra a la parte posterior del horno (10 min).
- 3. Se cargan 2 tolvas de chatarra de fundición, aproximadamente 1200 kg (20 min).

- 4. Se distribuye la chatarra en el horno y se cierra la puerta (10 min)
- 5. Se espera a que la chatarra de fundición se vuelva líquida (80 min)
- 6. Se abre la puerta y se agita el metal líquido (15 min)
- 7. Se cargan 3 tolvas de chatarra de conformado, aproximadamente. 695 kg (20 min).
- 8. Con el montacargas se introduce la chatarra que quedo en la entrada hacia el fondo del horno (10 min).
- 9. Se cargan 2 tolvas más de chatarra de conformado, aproximadamente 465 kg (15 min) y se hace lo mismo que en el paso 8 (10 min).
- 10. Se repite el paso 9 una vez más (25 min).
- 11. Se coloca la tapa del horno y se espera para agitar (40 min).
- 12. Se quita la tapa del horno y se agita (20 min).
- 13. Se carga lo restante de chatarra de conformado, realizando lo mismo que en el paso 9, esto se hace cuatro veces, aproximadamente 1860 kg (45 min).
- 14. Con el montacargas se agita y se coloca la tapa (15 min).
- 15. Se espera a que la chatarra de conformado se funda (50 min).
- 16. Se quitan la tapa del horno y se agita para que se fundan los últimos restos de chatarra que aun quede (20 min).
- 17. Con el montacargas y el agitador se elimina la escoria (15 min).
- 18. Se toma una probeta, para el análisis químico, directamente del aluminio líquido (3 min).
- 19. Se agregan el silicio y el cobre si son necesarios y se agita para que se disuelvan, entre 150 y 300 kg de silicio y entre 30 y 70 kg de cobre (50 min).

Las dos aleaciones fabricadas en Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V. y por lo tanto las que se estudiaron son la 380 y la AlSi9Cu3, estas aleaciones son vendidas a clientes que las utilizan para fabricar piezas por fundición a presión.

Por lo tanto estas aleaciones tienen que tener una composición química específica para cumplir con los estándares solicitados por los clientes, para que las piezas fabricadas a partir de estas aleaciones tengan las propiedades mecánicas adecuadas.

Tabla 32. Composición química de la aleación 380 fabricada en Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.

| Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mg (%) | Zn (%) | Mn (%) | Ni (%) | Sn (%) |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8.00 | 0.80 | 3.25 | 0.20 | 1.00 | - | - | - |
| 9.50 | 1.10 | 4.00 | 0.30 | 2.25 | 0.50 | 0.50 | 0.35 |

Tabla 33. Composición química de la aleación AlSi9Cu3 fabricada en Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.

| Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mg (%) | Zn (%) | Mn (%) | Ni (%) | Sn (%) |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8.85 | - | 2.00 | 0.10 | - | 0.10 | - | - |
| 10.90 | 1.20 | 3.50 | 0.50 | 1.20 | 0.50 | 0.30 | 0.10 |

2.2.2 ELEMENTOS QUE SE AJUSTAN TÍPICAMENTE PROVENIENTES DE CHATARRA DE FUNDICIÓN

Como se mencionó anteriormente la chatarra de fundición contiene una mayor cantidad de elementos aleantes que la chatarra de conformado, es por esto que se hicieron análisis químicos en el espectrómetro de emisión atómica para determinar la composición química del metal líquido usando solo chatarra de fundición, es decir, sin cargar chatarra de conformado al horno, con el fin de conocer la contribución de elementos aleantes a la aleación por chatarra de fundición.

| Tabla 34, Composición | química de diferente | s aleaciones generada | a solo por | r chatarra de f | undición |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------|-----------------|----------|
| Tabla 54. Composicion | quinnea de unerente | s aleaciones generau | a 3010 poi | chatana ue i | unuicion |

| Fusión | Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mn (%) | Mg (%) | Zn (%) |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 8.49 | 0.98 | 2.73 | 0.190 | 0.156 | 2.83 |
| 2 | 8.34 | 0.86 | 2.58 | 0.182 | 0.143 | 2.71 |
| 3 | 8.66 | 0.79 | 2.86 | 0.197 | 0.166 | 2.64 |
| 4 | 8.24 | 0.72 | 2.69 | 0.153 | 0.312 | 2.29 |
| 5 | 7.97 | 0.95 | 2.77 | 0.168 | 0.301 | 2.48 |
| 6 | 8.42 | 1.07 | 2.91 | 0.146 | 0.317 | 2.34 |
| 7 | 8.41 | 0.73 | 2.82 | 0.155 | 0.540 | 2.77 |
| 8 | 7.82 | 0.68 | 2.68 | 0.175 | 0.420 | 2.69 |
| 9 | 8.17 | 0.99 | 2.55 | 0.199 | 0.462 | 2.76 |
| 10 | 7.98 | 1.12 | 2.94 | 0.144 | 0.500 | 2.85 |
| 11 | 8.64 | 0.81 | 3.11 | 0.167 | 0.355 | 2.59 |
| 12 | 8.34 | 1.03 | 2.87 | 0.149 | 0.443 | 2.47 |
| 13 | 7.93 | 0.74 | 2.75 | 0.164 | 0.309 | 2.31 |
| 14 | 8.44 | 0.86 | 3.07 | 0.139 | 0.365 | 2.68 |
| 15 | 8.25 | 0.74 | 2.75 | 0.178 | 0.429 | 2.42 |

Los datos mostrados en la tabla 34 se esquematizaron en la gráfica 1, la primera fila de "puntos" a lo largo del eje de las ordenadas, corresponden al análisis químico obtenido en una primera fusión de chatarra de fundición, la segunda fila de "puntos" pertenecen a una segunda fusión (distinta a la primera), manteniendo solo el uso de chatarra de fundición, y así sucesivamente en las siguientes filas de "puntos" en la gráfica 1, es decir, cada fila de "puntos" representa una fusión distinta una de otra, teniendo en común todas, el hecho de solo haber utilizado piezas de chatarra de fundición en todas las fusiones.



Gráfica 1. Porcentaje de elementos aleantes intrínsecos de la chatarra de fundición.

Se observa en la gráfica 1 que si solo se utilizara chatarra de fundición los elementos aleantes quedarían ajustados de acuerdo a la composición química requerida mostrada en las tablas 32 y 33, a excepción del cobre en el caso de la aleación 380, ya que esta aleación requeriría que se le agregara cobre para poder alcanzar el límite mínimo establecido (3.25%).

Sin embargo el utilizar solo chatarra de fundición en la fusión incrementaría el costo de producción significativamente, es por esto que se carga un cierto porcentaje de chatarra de conformado para disminuir el costo de producción de la aleación, aunque esto signifique que el porcentaje de los elementos aleantes disminuya.

2.2.3 INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE CHATARRA DE CONFORMADO Y CHATARRA DE FUNDICIÓN CARGADA, PARA EL AJUSTE DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

Como se señaló anteriormente, es necesario utilizar en la fusión una mezcla de chatarra de fundición y de conformado para que no se eleve el costo de producción de la aleación (el precio de la chatarra de fundición es mayor al precio de la chatarra de conformado), además de reducir el porcentaje de algunos elementos aleantes. La cantidad de chatarra de fundición y de conformado utilizada, dependerá del tipo de aleación que se quiere fabricar. Si se desea producir una aleación 380, entonces se tiene que utilizar una mayor cantidad de chatarra de fundición, ya que este tipo de chatarra provee a la aleación un gran porcentaje de elementos aleantes sin sobre pasar ningún límite de composición, esto se observa claramente en la gráfica 1, y por lo tanto no se tendrán problemas de exceso de elementos aleantes. En cuanto a la cantidad de chatarra de

fundición que se utiliza para la fabricación de la aleación AlSi9Cu3, esta tiene que ser menor que la utilizada para fabricar la 380, ya que el porcentaje máximo permitido de Zn en la aleación AlSi9Cu3 es de 1.2%, si observamos de nuevo la gráfica 1 se aprecia que el porcentaje de Zn suministrado por la chatarra de fundición está por arriba del 2%, con lo cual estaríamos rebasando el límite de Zn, es por esto que se tiene que utilizar una mayor cantidad de chatarra de conformado para que no se eleve el porcentaje de Zn en la aleación, aprovechando que la chatarra de conformado tiene pocos elementos aleantes. En Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V. los porcentajes de chatarra de fundición y de conformado que se utilizan generalmente para fabricar las aleaciones 380 y AlSi9Cu3 se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 35. Porcentajes de chatarra utilizados para la fabricación de aleaciones 380 y AlSi9Cu3 en la planta industrial.

| Tipo de Aleación | Chatarra de Fundición (%) | Chatarra de Conformado (%) |
|------------------|---------------------------|----------------------------|
| 380 | 65 - 75 | 25 - 35 |
| AlSi9Cu3 | 35 - 50 | 50 - 65 |

Para visualizar de una mejor manera el efecto que tiene la cantidad de chatarra que se utiliza en la fabricación de aleaciones, se analizaron diferentes fusiones para registrar el cambio de la composición química en cada aleación, de acuerdo a la cantidad de chatarra utilizada, los datos de este análisis se muestran en la tabla 36.

| Fusión No. | Tipo de Aleación | Chatarra de Fundición (kg) | Chatarra de Conformado (kg) | Chatarra de Fundición (%) | Chatarra de Conformado (%) | Si (%) | Cu (%) | Zn (%) |
|---------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|
| 1 | 380 | 4047 | 2178 | 65.01 | 34.99 | 6.15 | 2.29 | 2.07 |
| 2 | 380 | 5312 | 2024 | 72.41 | 27.59 | 6.21 | 2.66 | 2.15 |
| 3 | 380 | 5137 | 2063 | 71.35 | 28.65 | 6.68 | 2.37 | 2.06 |
| 4 | 380 | 5386 | 1849 | 74.44 | 25.56 | 6.16 | 2.21 | 2.01 |
| 5 | 380 | 4481 | 1944 | 69.74 | 30.26 | 6.53 | 2.32 | 1.90 |
| 6 | 380 | 4685 | 1724 | 73.10 | 26.90 | 6.84 | 2.87 | 2.11 |
| 7 | 380 | 4408 | 2016 | 68.62 | 31.38 | 6.23 | 2.19 | 1.96 |
| 8 | 380 | 4809 | 1982 | 70.81 | 29.19 | 6.82 | 2.44 | 2.00 |
| 9 | 380 | 4641 | 1875 | 71.22 | 28.78 | 6.57 | 2.28 | 2.28 |
| 10 | AlSi9Cu3 | 2347 | 4170 | 36.01 | 63.99 | 4.29 | 1.34 | 1.08 |
| 11 | AlSi9Cu3 | 2056 | 3961 | 34.17 | 65.83 | 4.07 | 1.45 | 1.17 |
| 12 | AlSi9Cu3 | 3391 | 2914 | 53.78 | 46.22 | 4.95 | 1.59 | 1.38 |
| 13 | AlSi9Cu3 | 3472 | 3031 | 51.86 | 48.14 | 5.32 | 1.51 | 1.30 |
| 14 | AlSi9Cu3 | 2355 | 3975 | 37.20 | 62.80 | 4.35 | 1.29 | 1.14 |
| 15 | AlSi9Cu3 | 2336 | 3518 | 39.90 | 60.10 | 4.12 | 1.21 | 1.26 |
| 16 | AlSi9Cu3 | 2813 | 3814 | 42.45 | 57.55 | 4.26 | 1.33 | 1.19 |
| 17 | AlSi9Cu3 | 2628 | 3531 | 40.68 | 59.32 | 4.01 | 1.18 | 1.18 |
| 18 | AlSi9Cu3 | 2197 | 4301 | 33.81 | 66.19 | 4.29 | 1.17 | 1.23 |

Tabla 36. Composición química de los elementos aleantes críticos, en función del tipo y cantidad de chatarra utilizada.

Los datos de la tabla 36 se muestran en la siguiente gráfica, cada fila de "puntos" a lo largo del eje de las ordenadas corresponde a la composición química de una fusión.



Gráfica 2. Porcentaje de silicio, cobre y zinc en función de la cantidad de chatarra utilizada.

En la gráfica 2 se ve claramente el efecto que tiene utilizar una mayor cantidad de chatarra de conformado, los elementos aleantes de la aleación disminuye n cuando se utiliza un menor porcentaje de chatarra de fundición y por el contrario, la cantidad de estos aumenta cuando se utiliza una menor cantidad de chatarra de conformado.

Tomando en cuenta los porcentajes mostrados en las tablas 32 y 33 y analizando la gráfica 2 es evidente que la composición química requerida para la aleación 380 y AlSi9Cu3 no se logra alcanzar en el silicio y el cobre, es por esto que después de que toda la chatarra ha sido fundida es necesario elevar los porcentajes de silicio y cobre en ambos tipos de aleaciones, esto se consigue añadiendo silicio metálico y productos de cobre al metal líquido, haciendo esto se logra alcanzar los porcentajes de silicio y de cobre necesarios para cumplir con la especificación de composición química.

2.2.4 AJUSTE DEL SILICIO

Para elevar el porcentaje de silicio en la aleación, en Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V. utilizan silicio metálico. Después de que se fundió toda la chatarra, el silicio es agregado directamente al aluminio líquido, después de esto se comienza a agitar con ayuda del montacargas y una espadilla, el tiempo de agitación varía de acuerdo a la cantidad de silicio que se agregó.

Comúnmente se tiene que agregar una mayor cantidad de silicio cuando se fabrica la aleación AlSi9Cu3, ya que se tiene que alcanzar como mínimo un 8.85%.

En el caso de la aleación 380 se requiere una menor cantidad de silicio, ya que basta con alcanzar un 8.0% en esta aleación.



Figura 83. Silicio metálico utilizado para alear.



a)



b)

Figura 84. a) Silicio flotando en el aluminio líquido y b) Método de agitación utilizando el montacargas con la espadilla.

En algunas ocasiones es necesario agregar silicio a la aleación en más de una etapa, sobre todo en la aleación AlSi9Cu3. Esto sucede porque la cantidad de silicio que se agrega no es suficiente para alcanzar el porcentaje mínimo de este elemento, y por lo tanto se tiene que agregar una nueva cantidad de silicio por segunda vez.

2.2.5 AJUSTE DEL COBRE

Después de que se incorporó, agito y disolvió el silicio metálico en el aluminio líquido, se procede a añadir cobre (si es necesario) con el fin de ajustarlo a la composición química deseada. Los productos de cobre que se utilizan son muy diversos, pero generalmente son alambres, cables y tubos de cobre, algunas veces se llegan a utilizar lingotes de aleación de aluminio con un alto contenido de cobre (4 a 5% Cu).

Algunas veces no es necesario agregar cobre cuando se fabrica la aleación AlSi9Cu3, ya que el cobre por lo general queda dentro de los límites requeridos (2.0% como mínimo).

Sin embargo, en el caso de la aleación 380 si es necesario utilizar cobre para alcanzar el mínimo permisible (3.25%).

Al igual que en el caso del silicio, hay ocasiones en las cuales la cantidad de cobre añadida a la aleación no es suficiente para alcanzar el porcentaje mínimo de cobre, esto se presenta solo en la producción de la aleación 380. Y por lo tanto es necesario añadir una segunda vez cobre.





Figura 85. Productos de cobre utilizados para alear.

CAPÍTULO 3. EXPERIMENTACIÓN

3.1 ANÁLISIS TÉRMICO

Para alcanzar los objetivos de este trabajo se planeó realizar análisis térmicos para determinar la temperatura de fusión de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3, y de esta manera establecer la temperatura de trabajo de ambas aleaciones

3.1.1 EQUIPO UTILIZADO

El equipo utiliza para realizar esta prueba se muestra en la tabla 37.



Tabla 37. Equipo utilizado en los análisis térmicos.

3.1.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento que se siguió en los análisis térmicos es el siguiente:

- 1. Se tomaron muestras (probetas) de diferentes fusiones de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3.
- 2. Se coloca el crisol dentro del horno de resistencia eléctrica, se enciende y se fija una temperatura de 800°C.
- 3. Se introduce una probeta de aleación de aluminio al crisol y se espera a que se funda completamente.
- 4. Se conecta el termopar tipo K a la tarjeta adquisidora de datos.
- 5. Se prende la computadora previamente conectada a la tarjeta adquisidora de datos y se abre el software para registrar los datos.
- 6. Se comprueba que el termopar registre correctamente los cambios de temperatura.
- 7. Una vez que la probeta se ha fundido, se saca el crisol del horno y se introduce el termopar en el aluminio líquido para que el software comience a registrar los cambios de voltaje.

3.2 ANÁLISIS CINÉTICO

Para determinar el tiempo óptimo de aleación de silicio y cobre y las cantidades exactas que hay que agregar de estos elementos aleantes, se realizó un análisis cinético del proceso de aleación de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3 en la planta industrial.

3.2.1 EQUIPO UTILIZADO

El equipo utilizado en este análisis se muestra en la siguiente tabla:



Tabla 38. Equipo utilizado en el análisis cinético.



Continuación de la tabla 38.

3.2.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento que realizo en la planta industrial consistió en lo siguiente:

- 1. Tomar una probeta directamente del aluminio líquido una vez que toda la chatarra este fundida y medir la temperatura.
- 2. Realizar el análisis químico en el espectrómetro de emisión atómica a la probeta de aluminio.
- 3. De acuerdo a los porcentajes de silicio y cobre resultantes del análisis químico, determinar la cantidad de silicio y cobre a agregar al metal líquido.
- 4. Pesar el silicio y cobre en una báscula industrial.
- 5. Añadir el silicio al aluminio líquido y agitar el baño con la espadilla previamente ensamblada al montacargas.
- 6. Tomar una probeta directamente del aluminio líquido cada 8 a 10 minutos después de haber agregado el silicio y medir la temperatura del metal líquido con el multímetro, las ultimas probetas se tomaran

cada 20 a 40 minutos para visualizar el efecto de oxidación de los elementos aleantes. Realizar lo anterior hasta terminar el proceso de aleación.

- 7. Si es necesario agregar cobre al aluminio líquido, después de haber cargado el silicio, continuar tomando las probetas cada 8 a 10 minutos además de medir la temperatura. Hacer esto manteniendo la agitación continuamente.
- 8. Una vez terminado el proceso de aleación analizar las probetas obtenidas en el estudio cinético, en el espectrómetro de emisión atómica.

> CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS TÉRMICO

A continuación se presentan dos de las nueve curvas de enfriamiento obtenidas en el análisis térmico, correspondientes a la aleación 380 y AlSi9Cu3.

4.1.1 CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LA ALEACIÓN 380



Gráfica 3. Curva de enfriamiento de una aleación 380.



Gráfica 4. Curva de enfriamiento de una aleación 380.

4.1.2 CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LA ALEACIÓN AlSi9Cu3



Gráfica 5. Curva de enfriamiento de una aleación AlSi9Cu3.



Gráfica 6. Curva de enfriamiento de una aleación AlSi9Cu3.

En la tabla 39 se registran las temperaturas de inicio y final de solidificación de las aleaciones 380 y AlSi9Cu3.

| Tipo de Aleación | Temperatura de inicio de la Solidificación (°C) | Temperatura del final de la Solidificación (°C) |
|----------------------|--|--|
| | 582 | 568 |
| | 580 | 559 |
| | 575 | 565 |
| | 583 | 564 |
| 380 | 585 | 562 |
| | 589 | 564 |
| | 588 | 562 |
| | 580 | 564 |
| | 587 | 566 |
| Intervalo Promedio = | 578-588 | 562-565 |
| | 581 | 567 |
| | 590 | 566 |
| | 583 | 562 |
| | 579 | 564 |
| AlSi9Cu3 | 585 | 567 |
| | 581 | 564 |
| | 583 | 565 |
| | 579 | 562 |
| | 590 | 561 |
| Intervalo Promedio = | 580-590 | 560-567 |

Tabla 39. Temperaturas obtenidas en el análisis térmico.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los análisis térmicos es claro que la temperatura de inicio y final de la solidificación en las aleaciones 380 y AlSi9Cu3 es prácticamente la misma, se esperaría que las temperaturas de la aleación AlSi9Cu3 fueran menores, ya que esta tiene un mayor contenido de silicio, por lo que la aleación está más cerca del punto eutéctico.

En cambio la aleación 380 tiene menos silicio y por lo tanto sus temperaturas de inicio y final de la solidificación tendrían que estar por arriba de las de la aleación AlSi9Cu3, por estar la 380 más alejada del punto eutéctico.

Sin embargo como se mencionó en el capítulo 1.4.6, tanto el cobre como el zinc disminuyen la temperatura de fusión de la aleación, recordando lo anterior, es fácil explicar el porqué de estas temperaturas parecidas en ambas aleaciones. La aleación 380 (3.25 a 4.0% de Cu y de 1.0 a 2.25% de Zn) tiene un mayor contenido de cobre y zinc que la AlSi9Cu3 (2.0 a 3.5% de Cu y 1.2% de Zn como máximo), la diferencia de porcentajes de estos elementos en las aleaciones, son la razón por la cual las temperaturas son prácticamente iguales.

Con los datos de la tabla 40 se determina que la temperatura de trabajo es igual al intervalo promedio de la temperatura de inicio de solidificación más 50°C, esto último porque se ha reportado en la literatura que se consiguen mejores resultados trabajando con una temperatura 50°C mayor que la temperatura de fusión de la aleación.

Tabla 40. Temperatura de trabajo para la aleación 380 y AlSi9Cu3 determinada mediante los análisis térmicos.

Temperatura de trabajo 640-660

4.2 CINÉTICA DE DISOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

Una vez que se determinó la temperatura de trabajo de ambas aleaciones, se procede a realizar el análisis de la cinética de disolución de los elementos aleantes en la planta industrial, siguiendo el procedimiento mencionado en el capítulo 3.2.2. En las siguientes gráficas, la primera fila de "puntos", es decir, los conglomerados al eje principal de las ordenadas, corresponden a la composición química obtenida de la primera probeta tomada del aluminio líquido, analizada en el espectrómetro de emisión atómica, esta probeta fue tomada antes de añadir el silicio al metal líquido, la segunda fila de "puntos" indican la composición química de la segunda probeta tomada al minuto ocho después de haber añadido el silicio a la aleación, la tercera fila de "puntos" corresponde a la tercer probeta tomada del aluminio líquido y así sucesivamente las siguientes filas de "puntos" corresponden a la composición química obtenida de las otras probetas tomadas a lo largo del proceso de aleación. La línea naranja representa la temperatura del metal líquido al momento de haber tomado cada probeta. La tabla al lado de la gráfica indica los kilogramos de silicio y cobre agregados a la aleación y el minuto en el cual fueron cargados, el minuto cero indica que se agregó el elemento al iniciar la prueba.

4.2.1 CINÉTICA DE DISOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN UNA ALEACIÓN 380



Gráfica 7. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación 380.



Gráfica 8 Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación 380.



Gráfica 9. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación 380.



Gráfica 10. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación 380.



Gráfica 11. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación 380.



Gráfica 12. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación 380.



Gráfica 13. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación 380.

Analizando el perfil de temperaturas en las gráficas de cinética de disolución se aprecia que la temperatura del metal fundido baja drásticamente cuando se agrega el Si, esto se debe a que el Si se agrega a temperatura ambiente lo que origina un gradiente térmico entre el metal fundido y los cristales de Si, y para compensar este gradiente térmico el baño líquido le cede energía al Si lo que a su vez provoca que la temperatura en el metal fundido disminuya entre 20 y 30°C. Esto se ejemplifica en la siguiente tabla:

| Fusión No. | Temperatura inicial de la aleación (°C) | Silicio agregado (kg) | Temperatura después de agregar el silicio (°C) | ΔT (°C) |
|------------|--|--------------------------|---|---------|
| 1 | 621 | 123 | 606 | 15 |
| 2 | 633 | 169 | 602 | 31 |
| 3 | 636 | 152 | 600 | 36 |
| 4 | 628 | 180 | 607 | 21 |
| 5 | 639 | 143 | 609 | 30 |
| 6 | 642 | 110 | 619 | 23 |
| 7 | 644 | 170 | 615 | 29 |

Tabla 41. Gradientes de temperatura al agregar silicio a la aleación.

Esta disminución en la temperatura del baño líquido afecta considerablemente la disolución del Cu, ya que este elemento es más difícil de disolver y se vuelve más complicado si la temperatura del metal líquido es baja, y por lo tanto se requiera un mayor tiempo para alcanzar el nivel de cobre deseado, ya que a una menor temperatura la solubilidad disminuye. Además la temperatura del aluminio líquido se acerca a la del inicio de solidificación (como se determinó en el análisis térmico), por estas dos razones es conveniente precalentar los elementos aleantes antes de cargarse al horno, o en su defecto agregar primero el cobre a la aleación ya que la cantidad que se añade de este es menor a la del silicio, por este motivo no disminuirá tanto la temperatura del aluminio líquido.

La cantidad de silicio cargada cuando se fabrica la aleación 380, varía dependiendo del porcentaje inicial de silicio en la aleación. En las gráficas se observa que después de cargar el silicio, el porcentaje de este aumenta considerablemente, llega a un máximo y después de este punto comienza a disminuir gradualmente, esto ocurre porque conforme pasa el tiempo el silicio comienza a reaccionar con el oxígeno, es decir, se oxida. Es por esto que es recomendable alear lo más rápido posible para que no haya heterogeneidad en el porcentaje de silicio al comenzar y finalizar el vaciado de la aleación.

| Fusión No. | Si inicial (%) | Si agregado (kg) | Si máximo alcanzado (%) | Si final (%) |
|---------------|-------------------|---------------------|----------------------------|-----------------|
| 1 | 6.15 | 123 | 8.44 | 7.89 |
| 2 | 6.21 | 169 | 8.64 | 7.93 |
| 3 | 6.68 | 152 | 8.59 | 7.77 |
| 4 | 6.16 | 180 | 8.74 | 7.95 |
| 5 | 6.39 | 143 | 8.38 | 7.65 |
| 6 | 6.77 | 110 | 8.42 | 7.92 |
| 7 | 6.09 | 170 | 8.60 | 7.82 |

Tabla 42. Comportamiento del silicio en el proceso de aleación.

En la gráfica 7 se observa que después de cargar el silicio, como es de esperarse el porcentaje de este en la aleación se incrementó, sin embargo se aprecian dos puntos máximos en los minutos 32 y 40, lo cual indicaría que se agregó otra cantidad de silicio, adicional a la primera, sin embargo esto no se realizó, lo que explica este aumento repentino del porcentaje de silicio, es que justo en los minutos 32 y 40 los operadores dejaron de agitar, con lo cual el silicio que aún no se disolvía quedo agrupado en la boca del horno por lo cual el contenido de silicio en esta parte del horno se incrementó, después del minuto 40 se comenzó a agitar nuevamente y se observa en la gráfica un comportamiento regular semejante a los minutos 16 y 24. Esto también se aprecia en algunos puntos de las gráficas 8 y 9 en los minutos 24 y 40 y el 10.5, respectivamente. Por esta razón es tan importante mantener una agitación constante en el proceso de aleación, para que todo el aluminio líquido sea homogéneo en porcentajes de elementos aleantes.

Por otro lado, de acuerdo a lo que se observa en las gráficas del estudio cinético, el cobre también tiene un comportamiento similar al silicio, es decir, cuando se carga cobre a la aleación su porcentaje aumenta, llega a un máximo y posteriormente va disminuyendo. Sin embargo, en el caso del cobre esta fluctuación de porcentajes no es tan grande en comparación con el silicio. Esto se representa en la siguiente tabla:

| Fusión No. | Cu inicial (%) | Cu agregado (kg) | Cu máximo alcanzado (%) | Cu final (%) |
|---------------|-------------------|---------------------|----------------------------|-----------------|
| 1 | 2.29 | 0 | 2.29 | 1.98 |
| 2 | 2.66 | 60 | 3.28 | 2.81 |
| 3 | 2.37 | 0 | 2.5 | 1.84 |
| 4 | 2.21 | 70 | 3.46 | 3.28 |
| 5 | 2.53 | 85 | 3.47 | 3.11 |
| 6 | 2.37 | 100 | 3.49 | 3.02 |
| 7 | 2.76 | 75 | 3.62 | 3.21 |

Tabla 43. Comportamiento del cobre en el proceso de aleación.

Además se aprecia en las gráficas, que al añadir cobre a la aleación la temperatura de esta disminuye, esto ocurre ya que no se precaliente el cobre, sin embargo la disminución de la temperatura no es tan abrupta como en el caso del silicio, por lo cual no perjudica tanto.

En cuanto al comportamiento del hierro en el proceso de aleación, se observa en las gráficas que el porcentaje de este elemento está en función de la temperatura. Se aprecia que si la temperatura del metal líquido aumenta el contenido de hierro en la aleación se incrementa y si esta disminuye el porcentaje de hierro decrece. Esto se debe a que, una gran cantidad de piezas de chatarra de fundición contienen piezas de acero y/o de hierro, como es el caso de los pistones que tienen un anillo de acero, las resistencias de las planchas también son de acero, etc. Entonces al fundirse la chatarra de aluminio, las partes de acero y hierro quedan en el fondo del horno en estado sólido, y no son retiradas hasta después de terminar de vaciar, esto se observa en la figura 86. Es por esto que al haber una gran cantidad de restos de piezas de acero y hierro en contacto directo con el aluminio líquido permanentemente, si se aumenta la temperatura en el horno, el contenido de hierro en la aleación se incrementa, y por el contrario si la temperatura disminuye entonces el porcentaje de hierro en la aleación se incrementa, y en aluminio líquido en función de la temperatura se ha reportado en la literatura, este efecto se aprecia en la figura 87.

Las aleaciones que se fabrican en la planta industrial tienen un límite permisible alto de Fe en comparación con otras aleaciones, por lo que generalmente no se presentan problemas por contenidos altos de Fe. Sin embargo, si se requiriera fabricar otro tipo de aleación con porcentajes de Fe más bajos, sería necesario utilizar la zona de exudado del horno para que los restos de hierro y/o acero no estuvieran en contacto los restos de acero y hierro con el aluminio fundido.



Figura 86. Restos de piezas de acero y hierro sacadas del horno después de haber vaciado el horno.



Figura 87. Cinética de saturación del aluminio fundido durante la disolución de una barra de acero²⁷

Los elementos aleantes restantes no tienen una tendencia a oxidarse demasiado, a excepción del Mg. El Zn se quema muy poco, esto se aprecia en la graficas de cinética de disolución, el Mn prácticamente permanece igual. El Mg es el elemento que tiene una mayor afinidad con el oxígeno, y esto se aprecia en las gráficas, el contenido inicial de Mg en la aleación disminuye siempre en el transcurso del proceso de aleación, es decir, el porcentaje presente en la aleación será menor al terminar de vaciar, en comparación con el inicio.

4.2.1 CINÉTICA DE DISOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN UNA ALEACIÓN AlSi9Cu3



Gráfica 14. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación AlSi9Cu3.



Gráfica 15. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación AlSi9Cu3.



Gráfica 16. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación AlSi9Cu3.



Gráfica 17. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación AlSi9Cu3.



Gráfica 18. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación AlSi9Cu3.



Gráfica 19. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación AlSi9Cu3.



Gráfica 20. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura de una aleación AlSi9Cu3.

Al igual que las gráficas de cinética de la aleación 380, las de la aleación AlSi9Cu3 reflejan el mismo comportamiento de los elementos aleantes, el porcentaje de Si se incrementa cuando se agrega Si a la aleación, llega a un máximo y disminuye. El contenido de Fe fluctúa de acuerdo a la temperatura que tenga el metal líquido, el Mg reacciona con el oxígeno y por lo tanto siempre hay una menor cantidad al final del proceso en la aleación, el Zn y Mn no tienen variaciones significativas.

Se sigue presentando en este caso la disminución de la temperatura del aluminio fundido por efecto de cargar el silicio sin precalentarlo.

| Fusión No. | Temperatura inicial de la aleación (°C) | Silicio agregado (kg) | Temperatura después de agregar el silicio (°C) | ΔT (°C) |
|------------|--|--------------------------|---|---------|
| 1 | 715 | 297 | 606 | 109 |
| 2 | 668 | 315 | 602 | 66 |
| 3 | 657 | 359 | 607 | 50 |
| 4 | 688 | 359 | 613 | 75 |
| 5 | 697 | 335 | 606 | 91 |
| 6 | 679 | 330 | 598 | 81 |
| 7 | 672 | 305 | 613 | 59 |

Tabla 44. Gradientes de temperatura al agregar silicio a la aleación.

Analizando la tabla 44 se aprecia que en comparación con la aleación 380, la temperatura inicial de la aleación es mayor en la AlSi9Cu3, esto es porque los operadores del horno saben por experiencia que la aleación

AlSi9Cu3 necesita una mayor cantidad de Si para alcanzar el mínimo permitido, y al elevar más la temperatura tratan de compensar el gradiente de temperatura que se generara al cargar el Si, aun así el gradiente de temperatura que se presenta es mayor que en el caso de la aleación 380. Además en la gráfica 15 y 17 fue necesario añadir dos veces Si a la aleación, ya que con una sola carga no basto para alcanzar el porcentaje mínimo permitido.

En la tabla 45 se resume la cantidad de Si que se cargó en las diferentes fusiones de la aleación AlSi9Cu3.

| Fusión | Si inicial | Si agregado | Si máximo | Si final |
|--------|------------|-------------|---------------|----------|
| No. | (%) | (kg) | alcanzado (%) | (%) |
| 1 | 4.29 | 297 | 8.73 | 7.92 |
| 2 | 4.07 | 285 | 9.23 | 8.77 |
| 3 | 4.14 | 359 | 9.47 | 8.83 |
| 4 | 5.32 | 281 | 9.22 | 8.95 |
| 5 | 4.45 | 335 | 9.21 | 8.75 |
| 6 | 4.39 | 330 | 9.25 | 8.64 |
| 7 | 4.43 | 305 | 9.27 | 8.96 |

Tabla 45. Comportamiento del silicio en el proceso de aleación.

En el caso del cobre las cantidades que se agregaron a la aleación AlSi9Cu3 son muy similares a las de la 380, esto es algo un tanto ilógico ya que en teoría la aleación AlSi9Cu3 al tener un límite mínimo de cobre menor (2.00%) que la aleación 380 (3.25%) se debería de necesitar una menor cantidad de cobre para alcanzar este mínimo, sin embargo como se aprecia en las gráficas 14, 15 y 16 esto no ocurrió y fue necesario agregar una segunda vez cobre para lograr alcanzar este mínimo. Esto es consecuencia de la baja temperatura a la cual está la aleación, al disminuir la temperatura por el efecto de cargar el Si es más complicado diluir el cobre, aunado a que este al tener una mayor densidad que la del aluminio líquido, se sumerge al fondo del horno por lo cual no es posible lograr una buena agitación del cobre con la espadilla (Figura 88), ya que esta es recta y no llega al fondo del horno.

En las gráficas 14, 15 y 16 se observa que fue necesario cargar dos veces cobre a la aleación, ya que aunque se rebaso el límite mínimo de cobre, el porcentaje quedaba muy cercano al límite inferior y es necesario tener un porcentaje mayor para asegurar que los últimos lingotes vaciados estén dentro del rango de composición química permitida.

| Fusión No. | Cu inicial (%) | Cu agregado (kg) | Cu máximo alcanzado (%) | Cu final (%) |
|---------------|-------------------|---------------------|----------------------------|-----------------|
| 1 | 1.34 | 50 | 2.07 | 1.90 |
| 2 | 1.40 | 45 | 2.19 | 2.37 |
| 3 | 1.59 | 60 | 2.03 | 2.44 |
| 4 | 1.30 | 73 | 2.19 | 2.09 |
| 5 | 1.17 | 75 | 2.33 | 1.96 |
| 6 | 1.55 | 82 | 2.35 | 2.00 |
| 7 | 1.36 | 94 | 2.25 | 2.05 |

Tabla 46. Comportamiento del cobre en el proceso de aleación.

4.2.1 MODO Y EFECTO DE LA AGITACIÓN

Se decidió realizarle una modificación a la espadilla que se utiliza para agitar, ya que se observó que la agitación solo se alcanzaba en la superficie y no en el fondo del horno. Con esta modificación se consigue una mejor agitación en el metal líquido y además se aumenta la rapidez de disolución de los elementos aleantes. Esto también beneficia en una mejor homogenización del metal fundido, dado que al ser más grande la parte transversal de la espadilla y tener un ángulo de inclinación, se consigue un mayor movimiento y arrastre del metal líquido, consiguiendo mover el metal del fondo del horno.



Figura 88. Vista lateral de la espadilla recta que se utiliza para agitar, antes de la modificación.





b)

Figura 89. a) Sección transversal de la nueva espadilla la cual tiene un diámetro mayor al anterior. b) Vista del ángulo de inclinación en el nuevo agitador.

4.2.2 SECUENCIA DE CARGA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

Considerando los problemas observados que se producen por añadir primero el Si a la aleación, es decir, la disminución de la temperatura del aluminio fundido, una mayor oxidación del Si en el proceso de aleación y una mayor dificultad para disolver el cobre. Se decidió cambiar la secuencia en que se carga el Si y el Cu, fundamentándose en lo observado en la cinética de disolución de los elementos aleantes y teniendo como bases teóricas la termodinámica, haciendo la simplificación de que no hay ningún tipo de reacción entre los elementos aleantes y los elementos que se encuentran en dentro del horno.

Para determinar la secuencia de carga de los elementos aleantes (Si y Cu), se utiliza la termodinámica y la cinética de disolución.

Termodinámica: Se agregara primero el elemento aleante que tenga una energía libre de Gibbs más positiva, ya que esto indica que la formación del óxido del elemento es menos favorecida termodinámicamente.

Para conocer la energía de Gibbs de formación de los óxidos del Si y Cu se tiene que hacer el cálculo considerando que estos dos elementos están disueltos en aluminio líquido, sin embargo para este caso se considerara que los elementos están puros y solo reaccionan con el oxígeno individualmente, para esto se hace uso del diagrama de Ellingham considerando una temperatura de 650°C, resultando lo siguiente:

 $4Cu + O_2 \rightarrow 2Cu_2O, \quad \Delta G = -52 \ kcal/mol$ $Si + O_2 \rightarrow SiO_2, \quad \Delta G = -173 \ kcal/mol$

De acuerdo a lo anterior el elemento que está termodinámicamente más favorecido a oxidarse es el Si, por lo tanto el Cu tiende a oxidarse menos y entonces no hay tanto problema en agregarlo primero a la aleación, ya que no se oxidara tanto como el Si.

Una vez que se estableció la secuencia de carga de los elementos aleantes de acuerdo a la termodinámica, se procede a analizar la cinética de disolución del Si y Cu. Como se mencionó anteriormente el hecho de cargar primero el Si disminuye la temperatura del metal líquido en gran medida, dificultando la disolución del cobre, es por esto que es conveniente cargar primero el cobre.

Por lo tanto la secuencia de carga de los elementos aleantes queda de la siguiente manera:

| Secuencia de Carga | Elemento Aleante | ΔG (kcal/mol) | ΔT al cargar |
|--------------------|------------------|---------------|--------------|
| 1° | Cu | -52 | Pequeño |
| 2° | Si | -173 | Grande |

Tabla 47. Secuencia de carga de los elementos aleantes en aluminio.

Además de añadir primero el cobre en vez del silicio, también se decidió precalentar el cobre para cuantificar el efecto que esto conlleva.

4.2.3 RAPIDEZ DE DISOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

Para poder observar de manera clara el efecto de precalentar y cargar el cobre antes que el silicio, se realizó el mismo procedimiento que en la cinética de disolución de los elementos aleantes, al igual que las gráficas de la sección 4.2.1 cada fila de puntos representa el análisis químico de una probeta, resultando lo siguiente:



Gráfica 21. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura, de una aleación 380; precalentando y cargando primero el cobre.



Gráfica 22. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura, de una aleación 380; precalentando y cargando primero el cobre.



Gráfica 23. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura, de una aleación 380; precalentando y cargando primero el cobre.



Gráfica 24. Cinética de disolución de los 6 elementos aleantes principales y perfil de temperatura, de una aleación 380; precalentando y cargando primero el cobre.
Primeramente, analizando el perfil de temperaturas de las 4 gráficas anteriores se observa que la disminución de la temperatura en comparación con las gráficas en la cuales se agregó primero el silicio, es mucho menor. Esto es consecuencia de haber añadido primero el cobre en vez del silicio, además de haber precalentado el cobre antes de cargarlo al horno. Estos cambios de temperatura se plasman en la siguiente tabla.

| Fusión No. | Temperatura inicial de la aleación (°C) | Cobre agregado (kg) | Temperatura después de agregar el cobre (°C) | ΔT (°C) |
|------------|--|------------------------|---|---------|
| 1 | 641 | 68 | 632 | 9 |
| 2 | 650 | 35 | 646 | 4 |
| 3 | 657 | 65 | 650 | 7 |
| 4 | 649 | 87 | 644 | 5 |

Tabla 48. Gradientes de temperatura al agregar cobre a la aleación.

De acuerdo a los datos de la tabla 48, es claro que el gradiente de temperatura que se genera por cargar cobre al horno es muy pequeño, en comparación con los gradientes generados por añadir silicio al aluminio, comparando la tabla 48 con las tablas 41 y 44, se observa que los gradientes en la aleación 380 oscilaban entre 15 y 30°C y para la aleación AlSi9Cu3 entre 50 y 109°C. Por lo tanto, el hecho de precalentar el cobre antes de cargarlo, permite que el aluminio líquido se mantenga a una temperatura mayor a la que se tenía cuando se cargaba primero el silicio, esto aumenta la rapidez con que se disuelve el cobre en el aluminio, para visualizar este aumento en la rapidez de disolución del cobre, a continuación se presenta una gráfica en la cual se plasman las curvas de disolución del cobre sin precalentarlo y precalentándolo. Para apreciar mejor este efecto en la gráfica, fue necesario realizar un cálculo para que en todos los casos el porcentaje de cobre inicial sea de 2.16%, ya que de los casos comparados este es el porcentaje menor inicial de cobre, por lo tanto este valor será la referencia de inicio, el siguiente porcentaje de cobre será igual a la diferencia de los porcentajes medidos (reales) más el porcentaje anterior calculado (para el primer caso 2.16):

$$\% Cu_{inicio} = 2.16$$

% Cu_{i,calc} = (% Cu_{i,real} - % Cu_{i-1,real}) + % Cu_{i-1,calc}

Ejemplo:

En la gráfica 21 se obtuvo un porcentaje inicial de cobre de 2.195% (real), pero el valor de cobre inicial será de 2.16% (referencia), entonces el valor inicial de cobre será 2.16% y no 2.195%. El segundo valor de cobre en la gráfica 21 es de 2.745% (real), pero como se modificó el porcentaje inicial entonces hay que aplicar la formula anterior:

$$\% Cu_{2,calc} = (2.745\% - 2.195\%) + 2.16\% = 2.71\% Cu$$

Para el cálculo del tercer valor de cobre se realiza lo mismo, el porcentaje de cobre en la gráfica 21 es de 3.42% (real):

$$\% Cu_{3.calc} = (3.42\% - 2.745\%) + 2.71\% = 3.385\% Cu$$

De esta manera se pueden colocar todos los valores iniciales de cobre en 2.16% y se van modificando los valores subsecuentes, para que se sigan manteniendo los incrementos "reales" del cobre tal cual resultaron en los análisis químicos, aunque los valores serán distintos, en la tabla siguiente se ejemplifica esto, aplicándolo a los valores de la gráfica 21.

| %Cu _{real} | %Cu _{calc} | Incremento con respecto al valor anterior (%) |
|---------------------|---------------------|--|
| 2.195 | 2.160 | - |
| 2.745 | 2.710 | 0.550 |
| 3.420 | 3.385 | 0.675 |
| 3.430 | 3.395 | 0.010 |
| 3.470 | 3.435 | 0.040 |
| 3.405 | 3.370 | -0.065 |
| 3.445 | 3.410 | 0.040 |
| 3.325 | 3.290 | -0.120 |
| 3.30 | 3.265 | -0.025 |
| 3.22 | 3.185 | -0.080 |
| 3.18 | 3.145 | -0.040 |
| 3.10 | 3.065 | -0.080 |
| 3.02 | 2.985 | -0.080 |

Tabla 49. Calculo de un nuevo porcentaje de cobre manteniendo el incremento "real".

Realizando lo anterior a los datos de las gráficas donde se precalentó el cobre 21, 22, 23, 24 y a las gráficas 8, 11, 12 y 13 en donde no se precalentó el cobre, se obtiene la siguiente gráfica.



Gráfica 25. Cinética de disolución del Cu sin precalentar y precalentando.

En la gráfica 25 se observa claramente el efecto que provoca el precalentamiento del cobre, la pendiente de las curvas cuando no se precalienta el cobre es mucho menor que cuando si se precalienta, en otras palabras, el tiempo que tarda en disolverse el cobre en el aluminio liquido es menor cuando se precalienta el cobre. En la gráfica se puede apreciar que para alcanzar un máximo porcentaje de cobre en la aleación se requieren aproximadamente de 20 a 25 minutos de disolución de cobre precalentado, en cambio para cobre no precalentado el tiempo necesario para alcanzar un máximo es de aproximadamente de 35 a 50 minutos.

Para cuantificar los kilogramos efectivos de cobre en cada fusión de la gráfica anterior, se calcula el incremento de cobre, esto se hace restando el porcentaje final del inicial y dividendo los kilogramos de cobre entre este resultado, los resultados se enlistan en la tabla siguiente.

| Cu Inicial (%) | Cu agregado (kg) | Cu Máximo (%) | Incremento Cu (%) | kg Cu/%Cu |
|----------------|------------------|---------------|-------------------|-----------|
| 2.195 | 68 | 3.470 | 1.275 | 53.333 |
| 2.500 | 35 | 3.120 | 0.620 | 56.452 |
| 2.330 | 65 | 3.360 | 1.030 | 63.107 |
| 2.160 | 87 | 3.440 | 1.280 | 67.969 |
| 2.570 | 60 | 3.280 | 0.710 | 84.507 |
| 2.540 | 85 | 3.470 | 0.930 | 91.398 |
| 2.380 | 100 | 3.490 | 1.110 | 90.090 |
| 2.800 | 75 | 3.590 | 0.790 | 94.937 |

Tabla 50. Kilogramos efectivos de cobre en las fusiones analizadas.

Los valores sombreados de la tabla anterior corresponden a las fusiones donde se precalentó el cobre, y los valores que no están sombreados pertenecen a las fusiones donde no se precalentó el cobre. De acuerdo a la tabla 50, se requieren de entre 53 y 68 kg de cobre precalentado para aumentar un punto porcentual de cobre en la aleación, mientras que en el caso de utilizar cobre no precalentado se requerirán de entre 84 a 95 kg de cobre para aumentar un punto porcentual de cobre en la aleación.

Con estos resultados se comprueba que a una mayor temperatura del aluminio líquido, la velocidad de disolución y la cantidad que se disuelve de elemento aleante es mayor que cuando se tiene una menor temperatura.

En el caso del silicio no fue posible hacer estudios cinéticos precalentándolo, ya que no se disponía del equipo necesaria para precalentarlo, ya que al ser una cantidad mucho mayor la utilizada en comparación con el cobre, fue imposible adaptar la forma de precalentamiento al silicio. Sin embargo, se esperaría que el efecto de precalentar el silicio sea similar al efecto del cobre precalentado, es decir, un menor tiempo de disolución para alcanzar un máximo en la aleación, ya que no se generaría el gradiente de temperatura al agregar el silicio al aluminio líquido, con lo cual se mantendría un temperatura de trabajo adecuada para alear.

Por último, considerando de nuevo la gráfica 25, el tiempo que se requiere para disolver el cobre en el aluminio líquido es de 20 a 25 minutos, considerando que el cobre tiene que precalentado antes de cargarlo al horno. El tiempo de disolución del silicio se determina con las gráficas 21, 22, 23 y 24, y se considera a partir de que el silicio alcanza un máximo y se mantiene durante cierto tiempo, antes de que empiece a quemarse. Por lo tanto de acuerdo a estas gráficas el tiempo para disolver el silicio oscila entre 35 y 45 minutos después de haber aleado con cobre, este tiempo es considerando que no se precaliente el silicio.

| Si Inicial (%) | Si agregado (kg) | Si Máximo (%) | Incremento Si (%) | kg Si/%Si |
|----------------|------------------|---------------|-------------------|-----------|
| 6.215 | 140 | 8.263 | 2.048 | 68.359 |
| 5.880 | 160 | 7.570 | 1.690 | 94.675 |
| 6.253 | 130 | 8.391 | 2.138 | 60.804 |
| 6.076 | 173 | 8.560 | 2.484 | 69.646 |
| 6.210 | 169 | 8.931 | 2.721 | 62.110 |
| 6.390 | 143 | 8.322 | 1.932 | 74.017 |
| 6.770 | 110 | 8.360 | 1.590 | 69.182 |
| 6.092 | 170 | 8.440 | 2.348 | 72.402 |

Tabla 51. Kilogramos efectivos de silicio en las fusiones analizadas.

Para determinar la cantidad de cobre y silicio que se tienen que agregar al aluminio líquido es necesario considerar una cantidad constante de 5000 kg de aluminio líquido en el horno, partiendo de esta cantidad se analizan los datos de las gráficas 21, 22, 23 y 24, que es cuando se precalentó el cobre. Y considerando las cantidades de silicio y cobre cargado en las 4 fusiones y el porcentaje que se incrementó de silicio y cobre en la aleación, se realizó el siguiente cálculo para determinar el rendimiento del silicio y el cobre:

$$\% Rendimiento = Carga_{horno} \left(\frac{\% Elemento_{final} - \% Elemento_{inicial}}{kg_{cargados}} \right)$$

Utilizando los datos de la tabla 50 y 51 resulta:

| | Rendimiento Cu (%) | Rendimiento Si (%) |
|------------|--------------------|--------------------|
| | 93.750 | 73.143 |
| | 88.571 | 52.813 |
| | 79.231 | 82.231 |
| | 73.563 | 71.792 |
| | 93.750 | 80.503 |
| Promedio = | 83.779 | 67.552 |

Tabla 52. Rendimiento del cobre y del silicio en las fusiones analizadas.

Considerando que la masa del horno se mantiene constante (5000 kg) y que el porcentaje de incremento del silicio y cobre sigue un comportamiento lineal con respecto a los kilogramos cargados, se utiliza la siguiente fórmula para calcular los kilogramos necesarios para aumentar ciertos puntos porcentuales del elemento en la aleación:

$$Kg_{necesarios} = Carga_{horno} \left(\frac{\%_{aumentar}}{Rendimiento_{elemento}} \right)$$

Utilizando la formula anterior, resulta lo siguiente:

| Si a aumentar Si necesario | | | Si a aumentar | Si necesario |
|----------------------------|--------|---|---------------|--------------|
| (%) | (kg) | _ | (%) | (kg) |
| 0.00 | 0.00 | | 3.6 | 293.11 |
| 0.10 | 8.14 | | 3.7 | 301.25 |
| 0.20 | 16.28 | | 3.8 | 309.39 |
| 0.30 | 24.43 | | 3.9 | 317.53 |
| 0.40 | 32.57 | | 4.0 | 325.68 |
| 0.50 | 40.71 | | 4.1 | 333.82 |
| 0.60 | 48.85 | | 4.2 | 341.96 |
| 0.70 | 56.99 | | 4.3 | 350.10 |
| 0.80 | 65.14 | | 4.4 | 358.24 |
| 0.90 | 73.28 | | 4.5 | 366.38 |
| 1.00 | 81.42 | | 4.6 | 374.53 |
| 1.10 | 89.56 | | 4.7 | 382.67 |
| 1.20 | 97.70 | | 4.8 | 390.81 |
| 1.30 | 105.84 | | 4.9 | 398.95 |
| 1.40 | 113.99 | | 5.0 | 407.09 |
| 1.50 | 122.13 | | 5.1 | 415.24 |
| 1.60 | 130.27 | | 5.2 | 423.38 |
| 1.70 | 138.41 | | 5.3 | 431.52 |
| 1.80 | 146.55 | | 5.4 | 439.66 |
| 1.90 | 154.70 | | 5.5 | 447.80 |
| 2.00 | 162.84 | | 5.6 | 455.95 |
| 2.10 | 170.98 | | 5.7 | 464.09 |
| 2.20 | 179.12 | | 5.8 | 472.23 |
| 2.30 | 187.26 | | 5.9 | 480.37 |
| 2.40 | 195.41 | | 6.0 | 488.51 |
| 2.50 | 203.55 | | 6.1 | 496.65 |
| 2.60 | 211.69 | | 6.2 | 504.80 |
| 2.70 | 219.83 | | 6.3 | 512.94 |
| 2.80 | 227.97 | | 6.4 | 521.08 |
| 2.90 | 236.11 | | 6.5 | 529.22 |
| 3.00 | 244.26 | | 6.6 | 537.36 |
| 3.10 | 252.40 | | 6.7 | 545.51 |
| 3.20 | 260.54 | | 6.8 | 553.65 |
| 3.30 | 268.68 | | 6.9 | 561.79 |
| 3.40 | 276.82 | | 7.0 | 569.93 |
| 3.50 | 284.97 | | | |

Tabla 53. Kilogramos de silicio necesarios para aumentar cierta cantidad de puntos porcentuales,considerando una masa de 5000kg en el horno.

Tabla 54. Kilogramos de cobre necesarios para aumentar cierta cantidad de puntos porcentuales,considerando una masa de 5000kg en el horno.

| Cu a aumentar | Cu necesario | Cu a aumentar | Cu necesario |
|---------------|--------------|---------------|--------------|
| (%) | (kg) | (%) | (kg) |
| 0.00 | 0.00 | 3.6 | 236.34 |
| 0.10 | 6.56 | 3.7 | 242.90 |
| 0.20 | 13.13 | 3.8 | 249.47 |
| 0.30 | 19.69 | 3.9 | 256.03 |
| 0.40 | 26.26 | 4.0 | 262.60 |
| 0.50 | 32.82 | 4.1 | 269.16 |
| 0.60 | 39.39 | 4.2 | 275.73 |
| 0.70 | 45.95 | 4.3 | 282.29 |
| 0.80 | 52.52 | 4.4 | 288.86 |
| 0.90 | 59.08 | 4.5 | 295.42 |
| 1.00 | 65.65 | 4.6 | 301.98 |
| 1.10 | 72.21 | 4.7 | 308.55 |
| 1.20 | 78.78 | 4.8 | 315.11 |
| 1.30 | 85.34 | 4.9 | 321.68 |
| 1.40 | 91.91 | 5.0 | 328.24 |
| 1.50 | 98.47 | 5.1 | 334.81 |
| 1.60 | 105.04 | 5.2 | 341.37 |
| 1.70 | 111.60 | 5.3 | 347.94 |
| 1.80 | 118.17 | 5.4 | 354.50 |
| 1.90 | 124.73 | 5.5 | 361.07 |
| 2.00 | 131.30 | 5.6 | 367.63 |
| 2.10 | 137.86 | 5.7 | 374.20 |
| 2.20 | 144.43 | 5.8 | 380.76 |
| 2.30 | 150.99 | 5.9 | 387.33 |
| 2.40 | 157.56 | 6.0 | 393.89 |
| 2.50 | 164.12 | 6.1 | 400.46 |
| 2.60 | 170.69 | 6.2 | 407.02 |
| 2.70 | 177.25 | 6.3 | 413.59 |
| 2.80 | 183.82 | 6.4 | 420.15 |
| 2.90 | 190.38 | 6.5 | 426.72 |
| 3.00 | 196.95 | 6.6 | 433.28 |
| 3.10 | 203.51 | 6.7 | 439.85 |
| 3.20 | 210.08 | 6.8 | 446.41 |
| 3.30 | 216.64 | 6.9 | 452.98 |
| 3.40 | 223.21 | 7.0 | 459.54 |
| 3.50 | 229.77 | | |

> CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se comprobó que la chatarra de fundición tiene mayores porcentajes de elementos aleantes que la chatarra de conformado.

De acuerdo a los datos obtenidos en las curvas de enfriamiento utilizando el análisis térmico, se determinó que la temperatura de trabajo más adecuada para las aleaciones de aluminio 380 y AlSi9Cu3 es de 640 a 660°C.

La secuencia de carga de los elementos aleantes, que mejor resultados da en el proceso de aleación es la siguiente: cargar primero el cobre y después el silicio.

Se comprobó que el hecho de precalentar el cobre antes de añadirlo al aluminio líquido aumenta la velocidad de disolución y se aumenta el rendimiento del mismo.

El tiempo que se obtuvo para alear el cobre en las aleaciones 380 y AlSi9Cu3 tomando en cuenta las condiciones particulares de fusión es de 20 a 25 minutos.

El tiempo que requiere el silicio para llegar a un porcentaje máximo y sin quemarse es de 35 a 45 minutos, considerando las condiciones particulares de las fusiones.

Se encontró que una agitación constante en el proceso de aleación aumenta la velocidad de disolución de los elementos aleantes.

5.2 BIBLIOGRAFÍA

- 1. "Sector de la Industria del Aluminio y sus manufacturas 2010", Dirección General de Estrategias de Comercio Exterior, Subsecretaría de Comercio Internacional, pp. 3.
- 2. T. J. Brown, Bide, A. S. Walters, N. E. Idoine, R. A. Shaw, S. D. Hannis, P. A. J. Lusty, R. Kendall, "World Mineral Production 2005–09", British Geological Survey 2011, pp. 7-8.
- 3. Buenrostro Zagal, J. F., "Estudio del proceso de obtención de amonoalunita a partir de caolín para su transformación a alúmina" UAM, México, 2003, pp. 2-7.
- 4. "2009 Minerals Yearbook, Mexico [Advance Release]", U.S. Geological Survey, pp 15.6.
- 5. H.E. Mingqian, B, "Analysis of the Recycling Method for Aluminum Soda Cans", University of Southern Queensland, Australia, 2006, pp. 14-16.
- 6. ASM Metals Handbook Volume 2, Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, 2001, pp. 39-41.
- 7. Carrasco Vasquez, V. H., "Tecnología Mecánica II", Universidad Mayor de San Simón, Colombia, 2004, pp. 67-73.
- 8. "Aluminium Recycling The Road to High Quality Products", Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, pp. 11, 20.
- 9. "End-of-waste Criteria for Aluminium and Aluminium Alloy Scrap: Technical Proposals", European Commission, Institute for Prospective Technological Studies, 2010, pp. 7.
- 10. S. Bell, B. Davis, A. Javaid and E. Essadiqi, "Final Report on Scrap Management, Sorting and Classification of Aluminum", Canada, 2003, pp. 1-2, 7.
- 11. "Aluminium in cars", European Aluminium Association, pp.7, 10, 12.
- 12. Jirang Cui, Hans J. Roven, "Recycling of automotive aluminum", Transactions of Nonferrous Metals Society of China 20 (2010), pp. 2059.
- 13. "Determinación de Aluminio y Magnesio en las Tapas Abre-fácil de las Latas de Bebidas Gaseosas", Universidad Nacional de Salta, Argentina, 2011, pp. 1-2.
- 14. "Design for Recovery Guidelines: Aluminum Packaging", California Department of Resources Recycling and Recovery, 2011, pp. 5-24.
- 15. "Aluminium in Building and Construction", European Aluminium Association, pp. 2-4.
- 16. "La Sostenibilidad del Aluminio en la Edificación", European Aluminium Association, pp. 1-9.
- 17. Mark E. Schlesinger, "Aluminum Recycling", University of Missouri-Rolla, USA, 2007, pp. 62-72, 78-87, 113-118, 123-129, 193-194.
- 18. Nakajima, Kenichi, "Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling" Environmental Science & Technology, Vol. 44, No. 14, 2010, pp. 5595.
- 19. Kennedy, Scott, "Aluminum Melting and Metal Quality Processing Technology for Continuous High Quality Castings", American Foundry Society, 2001, pp, 2-5, 9.
- 20. "Modern Furnaces for Aluminum Scrap Recycling", SECO/WARWICK Corporation, pp. 1-5.
- 21. Snorre, Farner, "Remelting of Aluminium by Continuous Submersion of Rolled Scrap", Norwegian University of Science and Technology, Noruega, 2000, pp. 6-13.
- 22. W. Cahn, Robert, "Physical Metallurgy", Elsevier Science, Vol. I, 1996, pp. 136-142, 144-147
- 23. Y.M. Zhang, J. R.G. Evans, S. Yang, "The prediction of solid solubility of alloys: developments and applications of Hume-Rothery's rules", pp. 10-18.
- 24. <u>http://www.krdiecasting.com/pdf/Sect3.pdf</u> (consultada Noviembre 2012)

- 25. <u>http://www.limatherm.com/img/fck/8910041/limatherm/File/Technical%20information/Aluminium%2</u> <u>Ospecification.pdf</u> (consultada Noviembre 2012)
- 26. S. Gowri, F.H. Samuel, "Effect of Alloying Elements on the Solidification Characteristics and Microstructure of AI-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy", Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 25A, 1994, pp. 437-444.
- 27. V. N. Sharshin, S. V. Skitovich, V. A. Kechin, D. V. Subbotin, "Investigation of the Processes of Dissolution and Saturation of Aluminum Melts by Iron", Russian Journal of Non-Ferrous Metals, Vol. 48, No. 5, 2007, pp. 342.