



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**Tratamiento de escorias de aluminio y recuperación
de aluminio por medio de fundición con fundente de
NaCl – KCl.**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA
HUITZILIHUITL VARGAS GONZÁLEZ**



MÉXICO, D.F.

AÑO 2010



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: EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: CARLOS GONZALEZ RIVERA

SECRETARIO: ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO

1er. SUPLENTE: ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA

2do. SUPLENTE: AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIOS DE FUNDICIÓN, LABORATORIO MICROSCOPIA ÓPTICA,
LABORATORIO ARENAS, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D.**

ASESOR

SUPERVISOR TÉCNICO

**IQM EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO
TLAPANCO**

**Dr. JOSE ALEJANDRO GARCIA
HINOJOSA**

SUSTENTANTE

HUITZILIHUITL VARGAS GONZALEZ

Agradecimientos

Al Ing. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco, por su dirección en este trabajo, por compartir sus experiencias, por su paciencia, por compartir sus conocimientos conmigo y por su valioso apoyo durante el transcurso de mi carrera.

Al Ing. Arturo Alejandro Sánchez Santiago, por su colaboración, sus sugerencias y su tiempo.

Al Dr. Carlos González Rivera por sus experiencias y su tiempo.

Al Dr. José Alejandro García Hinojosa, por compartir sus conocimientos y por su valioso tiempo.

A la Ing. Aline Hernández García por su colaboración en la escritura de este trabajo, su paciencia y el tiempo dedicado.

Al M. en I. Adrian Manuel Amaro Villeda, por su colaboración en la parte técnica, sus conocimientos, así como el proporcionar las instalaciones para la realización de este trabajo.

Al Sr. Gabriel y al Sr. Fermín por su ayuda técnica y su colaboración.

A Javier Flores por la realización de los análisis químicos requeridos para el trabajo.

A Francisco T. Esteves por su valiosa colaboración en la parte experimental de este trabajo.

A Alexis Benítez por su colaboración en la parte escrita de este trabajo.

En general a todos mis maestros de la Facultad de Química, a la FQ y a la UNAM, por regalarme su experiencia sus conocimientos, su tiempo, sus vivencias y sobre todo por darme la oportunidad de estar en esta maravillosa universidad durante este tiempo que considero valioso en mi vida.

Dedicatoria

A mi hija Aixa, el nuevo motor de mi vida.

A mis padres Héctor Vargas Anguiano y Matilde González Jiménez por darme buenas oportunidades en la vida, por su tiempo dedicado, por sus conocimientos transmitidos, por las experiencias de vida y por todo aquello que me han regalado para que yo sea una mejor persona, sinceramente no tengo palabras para agradecer.

A mi hermano Quetzalli Tonatiuh por que lo hemos compartido todo, por ser un gran amigo.

A mis primos Josué, Moisés, Alexis, Joseline, porque me han ayudado a motivarme en este camino.

A Yuliana Quiroga, por la hermosa bebé, por el tiempo dedicado, por la vida sacrificada, gracias por todo.

A Dina Beatriz C. quien me enseñó a levantarme y que hay cosas que rebasan fronteras.

A mi tío Rubén y a mi tía Elvia por su fe depositada en mí.

A mis amigos de la Facultad Aline Hernández, Lulú Campos, Avirán (Avecita), Juan Manuel Hernández, Adán, Adair Jiménez, Guadalupita del Carmen, Valeria Mora, Laura Gutiérrez, Janina, Alejandra Lizbeth Herrera, Carlos Olaiz, Gaby Saksida, Teresa Rivas, Magali, Francisco Topiltzin, Sergio, Olmo, Zoraida, Karen, Jorge Luna, Paola Roncangliolo, Luis Villaverde, Carmen García, Adonai, Lorena Villuendas, Luisa Alaniz, Stalin, Rubén, Johny, Carlos Mares, Cuauh y a todos aquellos que me han otorgado su amistad y su confianza durante el transcurso de esta carrera.

A mis amigos y compañeros de vida Mauricio Sánchez, Citlalli Alaide, Lulú Hurtado, Beatriz (Choco), Carlos (Carnal), Julio Amhed, Amanda Zacil, Livia Valverde, Nancy, Tania y Pavel Velázquez, Diego Castro (Take), Ahuix, Carlos (Niño), Huey Oscar, Cristo, Fernando Lira, Huey Chipi, a mi cuñada Andyta, Eduardo (peavy), Gaby Luna, Carlos Velasco, Alex Marino, Rafael (Garu), Catalina (Naniwis) y a todos aquellos que comparten su tiempo conmigo.

A todas aquellas personas de mi familia que confían en mí y depositan su cariño en mí.

Al Ing. Ignacio Beltrán Piña[†] que me asesoro durante el transcurso de mi trabajo.

*“Cuanto más pesada sea la carga,
más a ras de tierra estará nuestra vida,
más real y verdadera será”*

Milan Kundera.

Indicé

Indicé	1
Introducción	4
Objetivos	6
Objetivos Particulares	6
Hipótesis	7

Capitulo 1

Antecedentes Teóricos.

1.1 Fundición de Aluminio	8
1.2 Escorias de Aluminio	8
1.3.0 Fundentes	11
1.3.1 Fundente de NaCl 50% – KCl 50%	13
1.4 Hornos para la fusión de aluminio y sus aleaciones	14
1.4.1 Hornos de Crisol	14
1.4.2 Hornos de Inducción	16
1.4.3 Hornos de Corazón Abierto o Reverbero	17
1.4.4 Horno de Resistencia	18
1.5 Filtración	19
1.5.1 Filtros Cerámicos	19
1.5.1.1 Filtros de SiC	20
1.5.1.2 Filtros de Zirconio	21
1.5.1.3 Filtros de Alúmina	21

Capitulo 2

Desarrollo Experimental

2.1 Análisis del fundente NaCl-KCl 50%-50%	22
2.1.1 Curva de Enfriamiento Fundente	22
2.1.2 Porcentaje de volatilización del fundente	23
2.2 Herramientas Auxiliares	24
2.3 Fusión y Colada	25
2.3.0.1 Preparación de la carga	26
2.3.0.2 Preparación del horno	26
2.3.0.3 Preparación del fundente	26
2.3.0.4 Preparación del sistema de filtrado	27
2.3.0.5 Clasificación de las escorias	28
2.3.1 Fusión 01-SF-A-20-0108	29
2.3.2 Fusión 02-SF-B-23-0109	29
2.3.3 Fusión 03-CF-A-26-0109	30
2.3.4 Fusión 04-CF-A-11-0209	31
2.3.5 Fusión 05-CF-A-12-02-0209	32
2.3.6 Fusión 06-CF-A-03-0309	32
2.3.7 Fusión 07-CF-A-25-0309	33
2.3.8 Fusión 08-CF-A-28-0809	34
2.3.9 Fusión 11-CF-A-03-0909	35
2.3.10 Fusión 12-CF-A-03-0909	35
2.4 Toma de muestras	37
2.4.1 Muestra para análisis químico	37
2.4.2 Muestras para metalografía	38

Capitulo 3

Resultados y Discusión

3.1 Curva de Solidificación y Rendimiento de la sales	40
3.2 Rendimiento de las cargas de escoria	41
3.2.1 Recuperación en horno de crisol	42
3.2.2 Recuperación en horno de resistencia	42
3.3 Análisis Químico	45
3.4 Análisis Metalográfico	50
4.0 Conclusiones	70
5.0 Bibliografía y Referencias	71

Introducción

En el ámbito ingenieril mundial el aluminio ha tenido más usos desde el siglo X, debido a su gran gama de propiedades mecánicas, físicas y químicas. Gran parte de estas propiedades se deben a la factibilidad de aleación que tiene el aluminio, dando como resultado una gama de posibilidades en lo que a propiedades mecánicas, físicas y químicas se refiere.

Todas estas propiedades compartidas con una baja densidad, han hecho que industrias como la automotriz, aeronáutica, electrónica y de alimentos, le den el empuje necesario para mantenerlo actualizado compitiendo en su uso con otros materiales como el acero, cobre y los polímeros en épocas contemporáneas.

A finales del siglo XIX se inicio la explotación comercial del aluminio, debido a las investigaciones independientes de Charles Hall y Paul Heroult, obteniendo a partir de Al_2O_3 fundido en criolita, un aluminio capaz de ser trabajado mecánicamente abriendo así el camino para el aluminio como un material de ingeniería.

Sin embargo desde la década de los ochentas del siglo pasado se ha venido dando un movimiento, en favor del uso, re-uso, reciclaje y aprovechamiento de energía de los materiales industriales así como un movimiento en favor de industrias más limpias y amigables con el ambiente, dando como resultado una serie de cambios en la industria e inversión en lo referente al reciclaje de los materiales.

Parte de este movimiento ha generado círculos de reciclaje y el aluminio no ha sido la excepción, esto aunado a las propiedades físicas y químicas del aluminio las cuales le otorgan una facilidad de reciclaje, lo ha colocado como puntero en la industria, desplazando a materiales como el acero y algunos polímeros de su uso en algunos ámbitos de la ingeniería.

Aún así el ciclo de reciclaje de aluminio no se encuentra completo dejando cabos sueltos en algunas partes de reciclaje principalmente en la industria de la fundición donde parte de este material se pierde como desecho del proceso, esto da como resultado pérdida de energía, material y dinero para las empresas fundidoras en México, así como los costos concernientes al desecho de estos materiales y el impacto ecológico de estos. Esto no solo se da en la industria del reciclaje si no en todos los niveles de la fundición por lo cual la cantidad de desechos en la industria metalúrgica mexicana es relativamente alto.

Objetivo

Determinar la practicidad del método de recuperación de aluminio a partir de las escorias de aluminio por el método de fundición con fundente de KCl-NaCl 50%-50%.

Objetivos particulares

- Evaluar el efecto del fundente de KCl-NaCl 50%-50%, sobre el tratamiento de las escorias de aluminio.
- Evaluar el efecto de los filtros cerámicos sobre la calidad del aluminio obtenido a partir del tratamiento de las escorias de aluminio.
- Determinar la practicidad del uso de hornos de crisol y hornos de resistencia en el tratamiento de las escorias de aluminio.

Hipótesis

- El uso del fundente de KCl-NaCl 50%-50% mostrara un auxilio significativo en el tratamiento de escorias de aluminio.
- El uso de Filtros cerámicos, mejorara la calidad metalúrgica del aluminio obtenido por el tratamiento de escorias de aluminio.
- El horno de resistencia mostrara una mejor calidad de producto acabado en comparación a la mostrada por el horno de crisol, en el tratamiento de escorias de aluminio.

Capítulo 1- Antecedentes Teóricos

1.1 Fundición de Aluminio.

Actualmente gran parte de las aleaciones de aluminio se realiza por medio del proceso de fundición, el cual consiste en llevar al material por arriba de su temperatura de fusión y agregarle los elementos aleantes, ya sea en forma de metales puros o por medio de aleaciones maestras, este proceso se lleva a cabo comúnmente en hornos de crisol, de resistencia, usando como elementos de calentamiento aceites combustibles, gas natural, gas LP, electricidad, o en grandes hornos de reverbero o inducción de baja frecuencia.

Comúnmente en los hornos pequeños se usan de manera batch o por paquetes introduciendo la carga metálica, retirando la escoria y colando de manera manual.

En el caso de los hornos grandes estos se mantienen a una temperatura constante para favorecer una fusión rápida, la carga y el retiro de escoria se hace de manera mecánica con maquinaria adecuada, el colado de esta se hace mediante pequeñas ollas y se puede hacer de manera robótica o manual en pequeñas piezas o en lingotes para forjar, extruir, laminar, etc.

1.2 Escorias de Aluminio.

Al realizarse una fusión de aluminio se obtienen normalmente un producto y un desecho. Este desecho es el producto de las reacciones entre los metales de la aleación y el oxígeno del aire principalmente, también lo constituyen las sales usadas como fundentes. Este desecho llamado escoria puede clasificarse en tres tipos de escoria.

Escoria blanca (White Dross): Escoria de aluminio con el color característico del aluminio, contiene entre un 15% y un 70% de porcentaje de aluminio metálico, combinado con sales y óxidos de aluminio.

Escoria Negra (Black Dross): Escoria de aluminio con un color negro característico de las sales quemadas, es un producto general de la metalurgia secundaria del aluminio.

Escoria concentrada (Saltcake): Esta caracterizado por un gran contenido de sales y poco contenido de aluminio metálico y algunas otras escorias. Al igual que la escoria negra este presenta colores muy oscuros.

Los principales componentes de las escorias es el Aluminio metálico, el oxido de aluminio Al_2O_3 (Oxido de Aluminio), AlN (Nitruro de Aluminio), AlC (Carburo de Aluminio), MgF_2 (Fluoruro de Aluminio), $NaAlCl_4$ (Tetracloroaluminato de Sodio), $KAlCl_4$ (Tetracloroaluminato de Potasio), SiO_2 (Oxido de Silicio), MgO (Oxido de Magnesio), $MgO \cdot Al_2O_3$ y la sales usadas en la fusión.

En los últimos años se han desarrollado procesos para el reciclado de las escorias blancas a estos procesos junto al reciclado de desechos pequeños resultantes de otros procesos metalúrgicos se le llama metalurgia secundaria del aluminio. La cual consiste en la re-fusión de la escoria blanca y su posterior obtención de aluminio de esta.

Actualmente el procedimiento se realiza en hornos rotatorios en los cuales se carga la escoria blanca y los desechos ligeros, agregando a estos sales fundentes en una cantidad no mayor al 20% de la carga total, en general estas sales fundentes actúan como fundente de cubierta para proteger al aluminio del oxígeno del ambiente, la humedad del ambiente y de los gases de combustión.

Algo importante dentro de estos procesos es que la escoria negra resultante y la escoria concentrada, deben ser tratadas previamente antes de ser desechadas debido a su gran contenido de sales.

1.3.0 Fundentes.

Los fundentes, son productos químicos agregados para modificar algún aspecto de la fundición de un material, como la fluidez, la afinidad a la oxidación, etc.

Los fundentes tienen los 3 aspectos físicos, son: sólidos, líquidos y gaseosos, aunque la mayoría de fundentes se presentan en forma de sales

Existen diferentes tipos de fundentes que se clasifican de acuerdo al tipo de función que realizan en el material fundido.

- Fundentes de recubrimiento. Son aquellos que por medios físicos forman una cubierta en la superficie del metal fundido para inhibir su contacto con agentes oxidantes.
- Fundentes escorificantes. Fundentes que aglutinan las escorias para mejorar o facilitar el retiro del metal fundido.
- Fundentes modificadores y/o refinadores. Materiales químicos que modifican la estructura final del metal colado.
- Fundentes desgasificantes. Realizan la función de capturar y retirar los gases solubles del baño metálico.

Existen fundentes que tienen dos o más de las funciones anteriores, o realizan funciones diferentes adecuadas para cada material.

Otra clasificación se basa en el carácter químico del fundente con respecto a la carga líquida:

- Fundentes oxidantes. Estos fundentes oxidan a la carga metálica, de acuerdo a la técnica de fusión

- Fundentes neutros. Este tipo de fundentes no oxidan ni reducen a la carga metálica.
- Fundentes reductores. Los fundentes reductores reducen a la carga metálica y esto es lo que se pretende en la mayoría de los casos al fundir una aleación.

Un punto importante dentro de las sales fundentes para aleaciones de aluminio es que deben cumplir con los requisitos comunes de los fundentes o seguir las siguientes características:

- Punto de fusión por debajo de los 720° C.
- Baja Viscosidad
- Fácilmente desechable
- No reacción con el crisol.
- Menor densidad al metal.
- No higroscópico.
- Baja presión de vapor.
- Bajo costo.
- Tratamiento de Bajo costo.

Dentro de estas características tenemos las sales de NaCl-KCl (Cloruro de Sodio-Cloruro de Potasio), NaCl-KCl-NaF (Cloruro de Sodio-Cloruro de Potasio-Fluoruro de Sodio), NaCl-KCl-CaF₂ (Cloruro de Sodio-Cloruro de Potasio-Fluoruro de Calcio), Na₃AlF₆-CaF₂-Al₂O₃ (Hexafluoraluminato de Sodio-Fluoruro de Calcio-Oxido de Aluminio).

1.3.1 Fundente de NaCl 50% – KCl 50%

Los Fundentes de NaCl – KCl son los más usados, ya que muestran un comportamiento químico neutro con los baños metálicos es decir no reduce ni oxida el metal líquido, aunque el punto de fusión de las sales es de alrededor de 800° C, observando su diagrama de fases que presenta un comportamiento isomorfo y que en su punto eutéctico esta mezcla de sales presentan un punto de fusión más bajo de 667° C el cual se adecua para el trabajo con aluminio. En el caso de la sal fundente usada esta se acerca al punto eutéctico de 49.3% de KCl.

La función del fundente de NaCl-KCl es generar un recubrimiento de sales fundidas sobre el material para protegerlo de la atmósfera, contribuyendo también al aglutinamiento de las escorias para facilitar así la limpieza del metal líquido. Al mismo tiempo éste eutéctico empieza a evaporarse evitando que los gases atmosféricos se pongan en contacto con la superficie del metal líquido ayudando a evitar la oxidación y por tanto la generación de escorias.

1.4 Hornos para la fusión de aluminio y sus aleaciones

Los hornos de fundición en general son usados para llevar a los metales y aleaciones a temperaturas superiores al de su punto de fusión para su tratamiento y trabajado en las industrias. En general estos se clasifican de una manera genérica dependiendo del tipo de alimentación de la carga, la fuente usada para generar calor, etc.

Estos pueden dividirse en:

1.4.1 Hornos de Crisol

El horno de crisol es un horno tipo batch o por bloque que funciona a base de combustible líquidos o gaseosos. Este horno contiene las siguientes partes importantes: carcasa, pared y piso refractarios, crisol metálico o refractario, y un quemador, que usa combustibles como gas natural, gasóleo, gas LP, diesel, petróleo u otros.

El proceso por el cual el horno funde el metal es el siguiente, el quemador colocada tangencialmente proyecta combustible y aire dentro del horno produciéndose una flama, ésta efectúa una trayectoria helicoidal alrededor del crisol, calentando el crisol y por conducción a través de las paredes del crisol el calor se transmite hacia el metal sólido, inicialmente y se lleva hasta su fusión. Los gases de combustión son retirados por una chimenea dispuesta en el horno, el material se carga directamente en la boca del crisol.

Un horno de crisol bien diseñado presenta varias ventajas técnicas, su principal ventaja es la facilidad de uso ya que no requiere operadores totalmente experimentados, al igual es el horno perfecto para industrias pequeñas y laboratorios ya que presenta un calentamiento rápido y uniforme, un rendimiento

de combustible óptimo superior al de otros hornos de combustibles, no requiere de una infraestructura de alto costo, ni requiere un lugar diseñado estrictamente para el ya que puede colocarse en cualquier lugar en una fundidora ya operable.

La principal desventaja de un horno de crisol bien diseñado es el tamaño de la carga ya que no pueden fundir grandes cargas, y tampoco se le pueden colocar piezas mayores a la boca del horno.

Las principales desventajas cuando el diseño es inadecuado son el contacto íntimo del aire y demás gases de la atmósfera con el metal fundido, en algunas ocasiones los gases de la combustión tienen contacto con el metal fundido. Gases como el oxígeno O_2 , y el vapor de agua, representan problemas sustanciales en la fundición de aluminio, debido a la oxidación del aluminio dejando escorias como alúmina Al_2O_3 y disolviendo hidrógeno en el aluminio fundido provocando posteriores defectos en las piezas coladas.

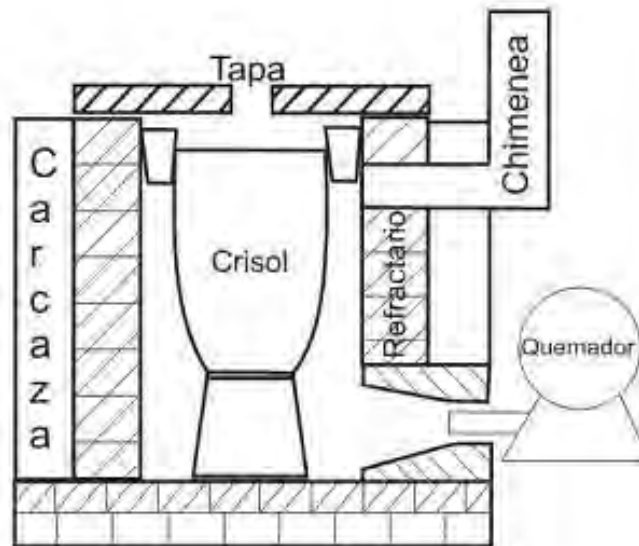


Figura 1- Horno de Crisol

1.4.2 Hornos de Inducción

Hornos de alimentación tipo batch o por bloques, que llevan a cabo el calentamiento por medio de inducción magnética sobre el material para así calentarlo y llevarlo a su punto de fusión. Recomendado en materiales magnéticos, cargas pequeñas hasta de altos tonelajes.

El horno de inducción consiste en un embobinado de cobre recubierto de refractario, debido al paso de corriente eléctrica en la bobina se produce un campo magnético que genera resistencia en la carga y esta se calienta.

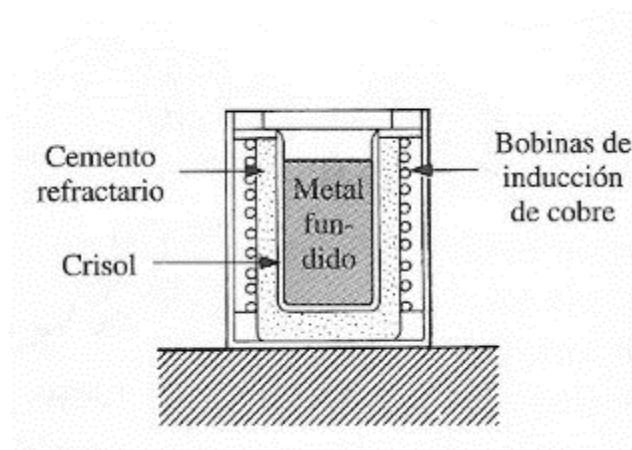


Figura 2- Horno de Inducción para metales no-ferrosos (1)

1.4.3 Hornos de Corazón Abierto o Reverbero

Hornos de alimentación continua que por lo regular necesitan una gran carga inicial para comenzar a trabajar que va desde 10 a 200 toneladas.

El horno de reverbero consiste en una recámara refractaria con quemadores internos dispuestos estratégicamente, para calentar el aluminio dentro de la cámara, una puerta de entrada para el material sólido y una tina de salida para el metal fundido.

Su principal ventaja es la rapidez de operación de este horno, sin embargo, su principal desventaja es; que el metal se encuentra en contacto íntimo con todos los gases de combustión como el CO_2 , CO , H_2O , O_2 , teniendo como consecuencia una gran presencia de hidrógeno solubilizado en el aluminio, gran cantidad de escoria debido a la oxidación.

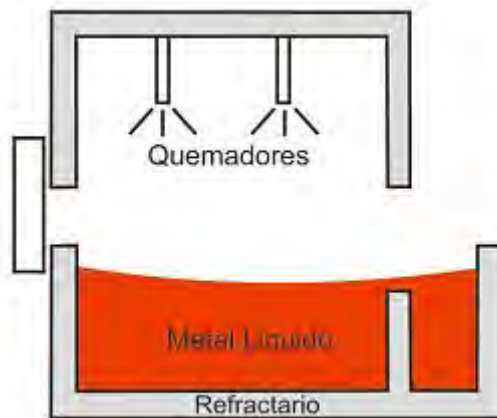


Figura 3- Horno de reverbero

1.4.4 Horno de Resistencia

El horno de crisol de resistencia es un horno tipo batch o por bloques, que consiste 2 partes una cubierta refractaria fusionada o adherida a una resistencia eléctrica y un crisol cerámico o metálico. La resistencia convierte la electricidad en energía calorífica, la cual se transfiere al crisol por medio de convección y radiación.

Presenta ventajas como el control de la atmosfera interna, control de temperatura y desventajas como el costo del insumo eléctrico.

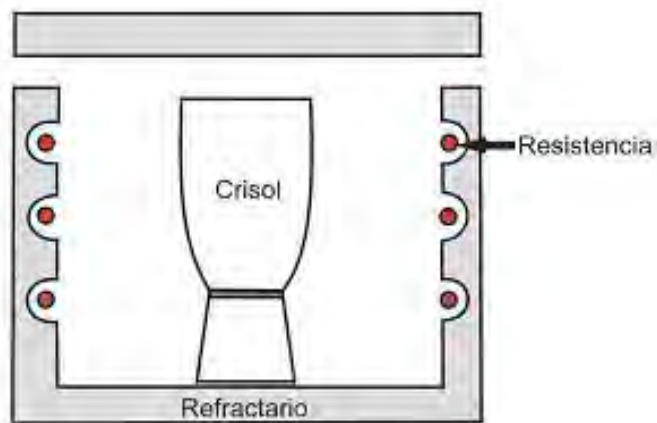


Figura 4- Horno de resistencia

1.5 Filtración.

La filtración es un procedimiento que ha ganado adeptos a través del tiempo, ya que son muchas las ventajas que ofrece a la hora de obtener las piezas finales.

El proceso de filtración consiste en hacer pasar el metal a través de un filtro cerámico o metálico colocado estratégicamente como copa de colada o en el interior del molde concretamente en el sistema de colada de la pieza.

Las ventajas que ofrece un filtrado a la hora de colar son las siguientes:

- Disminución de Inclusiones. Las partículas insolubles contenidas en el metal o en la escoria no alcanzan a pasar a través del filtro.
- Control del Flujo. El flujo turbulento de la colada al pasar por el filtro disminuye y genera un menor arrastre, lo cual se convierte en una reducción en el número de inclusiones y un mayor tiempo de vida en el caso de moldes permanentes.
- Retira Micro-capa de Óxidos. El metal al salir del horno y ponerse en contacto con el aire genera una micro-capa de óxidos que posteriormente se traduce en inclusiones, el filtro detiene el micro-film reduciendo así impurezas en el metal.

1.5.1 Filtros Cerámicos

Los filtros cerámicos en general esta compuestos por materiales como alumina, fluorspar, magnesita, cuarzo y grafito. Contienen propiedades físicas para mejorar la capacidad del filtrado y ayudar de manera considerable durante el proceso de fundición del metal. Algunas de las propiedades que contienen los filtros son las que se muestran a continuación.

- Ser de Fácil instalación, ya que se requieren poner sistemáticamente y de manera rápida y segura.
- Resistencia al metal liquido.
- Hidrofóbicos, o que no se mojen con facilidad, ya el agua condensada provoca sopladuras y accidentes, entre otras cosas, por lo cual se requiere un material que no tenga afinidad por la humedad.
- Alta resistencia mecánica a altas temperaturas.
- Dimensionalmente estable.

1.5.1.1 Filtros de SiC

Los filtros de SiC cuentan con conductividad térmica relativamente buena lo que les permite tener menores gradientes térmicos en el filtro mejorando el flujo continuo del metal líquido, es recomendado para fundiciones de hierro así como para filtro de metales no ferrosos su temperatura de trabajo, es alrededor de 1500 °C.



Figura 5- Filtro de SiC (3)

1.5.1.2 Filtros de Zirconio.

Filtros usados para aceros inoxidable, aleaciones de acero que requieren y aleaciones de precisión, trabaja a temperaturas de 1750 °C.



Figura 6- Filtro de zirconio (4)

1.5.1.3 Filtros de Alúmina.

Filtros para aluminio y aleaciones de aluminio, con temperaturas de trabajo de 1200 °C.



Figura 7- Filtro de Alúmina (4)

Capítulo 2- Desarrollo Experimental

2.1 Analisis del fundente NaCl-KCl 50%-50%

2.1.1 Curva de Enfriamiento Fundente.

Se realiza una curva de enfriamiento del fundente NaCl 50% - KCl 50% mediante la siguiente técnica, se pesan en una balanza analítica Sartorius (carga máx. 310g, precisión 0.005g) en un papel toalla seco cuidando previamente de tarar la balanza antes de agregar la sal una cantidad 300 gramos de cloruro de potasio, marca Reasol con una pureza de 99% posteriormente se trasvasa a un mortero y se muele de manera uniforme hasta que se desvanezcan los grumos de sal, posteriormente se trasvasa a un papel toalla seco y se coloca en una mufla a 100° C Industrias Figursa E-40 durante un tiempo de 20 minutos para secar completamente la sal.

Se pesan 280 gramos de cloruro de sodio, marca Reasol con una pureza de 99%, en una balanza analítica en un papel toalla cuidando previamente de tarar la balanza antes de agregar el cloruro de potasio, posteriormente se trasvasa a un mortero y se muele de manera uniforme, hasta que desvanezcan los grumos de sal, posteriormente se trasvasa a un papel toalla seco y se coloca en una mufla Industrias a 100° C durante un tiempo de 20 minutos para secar completamente la sal.

Se saca el cloruro de potasio de la mufla y se trasvasa a un mortero limpio y seco se muele verificando que no existan grumos en la sal, y se pesan en una balanza analítica 30 gramos de la sal en un papel cuidando que este perfectamente seco, cuidando además que la balanza este tarada con el papel.

Se saca de la mufla el cloruro de sodio y se trasvasa a un mortero limpio y seco se muele verificando que no existan grumos en la sal, y se pesan en una bascula analítica 30 gramos de la sal en un papel completamente seco, cuidando que el peso de este sea cuidadosamente tarada.

Se toman ambas sales y se trasvasan a un crisol cerámico, se mezclan homogéneamente y se colocan en una mufla SYBRON Thermolyne 2000 a 800° C hasta que la mezcla funda.

Fundida la mezcla se retira de la mufla y se le coloca un termopar tipo “K” el cual se conecta previamente a un equipo Registrador de temperaturas, modelo HP 7155B al que se le programa una escala de 1 mV/cm y una velocidad inversa de 10s/cm para obtener directamente la curva de enfriamiento, se toma la curva y se miden los puntos importantes, las líneas de solidus y liquidus, los datos obtenidos se convierten mediante una tabla de temperatura vs. Potencial para termopares tipo “K”.

2.1.2 Porcentaje de volatilización del fundente.

Se pesan en una bascula analítica en un papel toalla seco cuidando previamente de tarar la bascula antes de agregar la sal una cantidad 300 gramos de cloruro de potasio, posteriormente se trasvasa a un mortero y se muele de manera uniforme hasta que se desvanezcan los grumos de sal, posteriormente se trasvasa a un papel toalla seco y se coloca en una mufla a 100° C durante un tiempo de 20 minutos para secar completamente la sal.

Se pesan 280 gramos de cloruro de sodio, en una bascula analítica en un papel toalla cuidando previamente de tarar la bascula antes de agregar el cloruro de potasio, posteriormente se trasvasa a un mortero y se muele de manera uniforme,

hasta que desvanezcan los grumos de sal, posteriormente se trasvasa a un papel toalla seco y se coloca en una mufla a 100° C durante un tiempo de 20 minutos para secar completamente la sal.

Se toman 25 gramos de NaCl y 25 de KCl y se mezclan en un crisol de manera homogénea, se meten en una mufla precalentada a 850° C durante 20 minutos y se retiran y se pesan nuevamente en una báscula y se registran los resultados.

2.2 Herramientas Auxiliares.

Previamente a las fundiciones se fabrico:

- Un herramental de acero 1045 en forma de “J” de 50 centímetros de largo
- Una solera de acero 1045, forjada en frío, formando una curva de 85° respecto a la vertical con desbaste en las puntas inferiores formando bordes.

Estos herramentales se usaron para el manejo de las escorias y se les recubrió con pintura de zirconio ISOMOL 190-C diluida en alcohol de 96°, después de la pintura se seca a flama directa.

- Soporte para filtros, se fabricó con una alambra de acero la cual se forjó en frío hasta obtener un anillo de 8 centímetros de diámetro, el cual se suelda a una varilla de 25 centímetros de longitud y se le agrega mediante soldadura una cuerda, se enrosca en unas pinzas para soporte universal y se coloca en un soporte universal.

2.3 Fusión y Colada.

Las escorias se obtienen de procedimientos anteriores, llevados a cabo por terceros, sin información alguna más que la procedencia de estas.

Se clasifican las escorias de acuerdo a la procedencia de estas, de acuerdo a lo anterior se tienen escorias de procedencia industrial, escorias de procedencia escolar las cuales se subdividen de acuerdo al grupo y/o semestre de procedencia, o a la antigüedad de la escoria.

Cada escoria lleva un proceso de fusión, de agregado de fundente, filtración y colada.

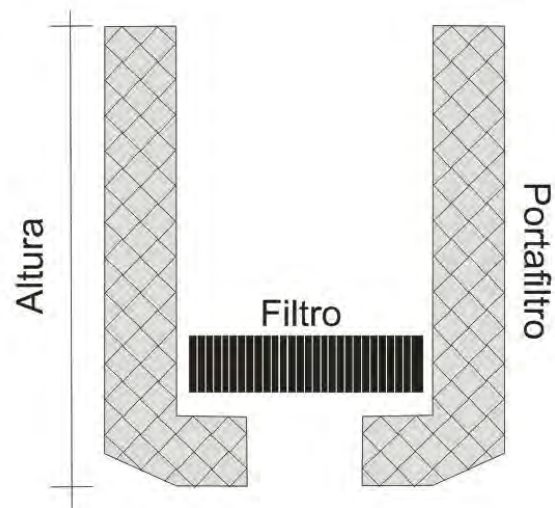


Figura 8- Filtro Cerámico, Marca Foseco, SEDEX, SiC, 20 ppi.

2.3.0.1 Preparación de la carga.

Se pesó la escoria de acuerdo a la fusión en una balanza OKEN (precisión 5g) de acuerdo a su clasificación.

Se pintó el crisol previo a cada fusión con pintura de zirconio de manera homogénea se dejó secar con flama y se coloca dentro del horno.

2.3.0.2 Preparación del horno.

Para el horno de crisol. Se encendió el horno de crisol, alimentado con gas LP y aire a presión mediante un quemador KLEIN con control de flujo manual y sin escala. Se precalentó hasta que el crisol se encuentre al "rojo vivo".

Para el horno de resistencia. Se encendió el horno de resistencia y se prefijo en una temperatura de 850° C, se espero a que se precalentara a 750° C para trabajar con este.

2.3.0.3 Preparación del fundente.

Se pesaron 150 gramos de NaCl previamente molido en una báscula sobre un papel seco previamente tarada y 150 de gramos de KCl previamente molido en una balanza sobre un papel seco previamente tarada, se colocaron en una estufa a 100° C durante 20 minutos, posteriormente se retiraron de la mufla y se trasvasaron a una charola de aluminio donde se mezclaron homogéneamente.

2.3.0.4 Preparación del sistema de filtrado.

Se pintó la lingotera con pintura de zirconio y posteriormente se secó a la flama y se colocó el sistema de filtrado.

El sistema de filtrado se preparó de acuerdo al esquema de la figura 9.

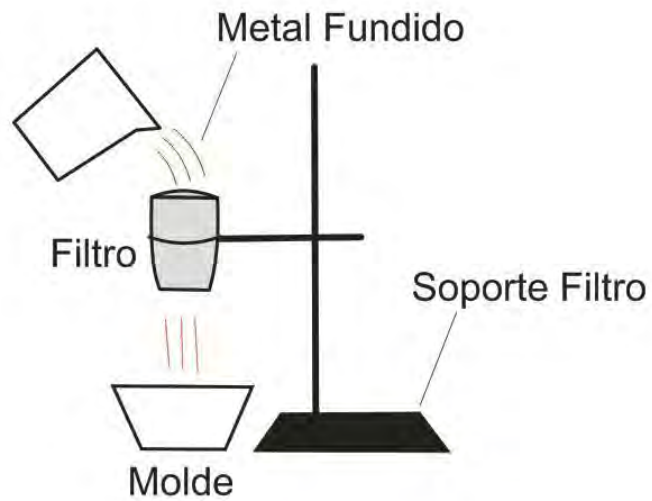


Figura 9- Dispositivo de Colada.

2.3.0.5 Clasificación de las escorias.

Las escorias se clasificaron de acuerdo a su origen.

Clasificación	Descripción	
UKN (Desconocida)	Escoria blanca de origen desconocido, procedencia laboratorio de metalurgia, contenidos medios de aluminio, arenas, escorias de aluminio, basura no industrial.	
IND (Industrial)	Escoria blanca de origen industrial, procedencia laboratorio de metalurgia, contenidos altos de aluminio, cerámicos, arenas, filtros, escorias de aluminio.	
PRO (Profesores Metalurgia)	Escoria blanca, origen laboratorio de metalurgia, procedencia laboratorio de metalurgia, con contenidos bajos de aluminio, arenas y altos contenidos de escorias de aluminio.	
EST (Estudiantes Metalurgia)	Escoria blanca, origen laboratorio de metalurgia, procedencia laboratorio de metalurgia, con contenidos altos de aluminio, arenas, escorias de aluminio y cerámicos.	

A continuación se mencionan las fusiones.

2.3.1 Fusión 01-SF-A-20-0108

Se pesaron 2000 gramos de escoria de aluminio clasificada como UKN.

Se encendió el horno de crisol, de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Ya precalentado el horno se agregó la escoria lentamente cuidando que no se desborde, y esperando a que la primera carga funda y compacte para agregar la siguiente hasta que se agregó la totalidad de la escoria, se limpio la nueva escoria generada con el herramental, se esperó que el aluminio fundiera y que llegara a su temperatura de trabajo.

Se puso un filtro cerámico FOSECO de 15 ppi tipo Sedex a precalentar en la flama indirecta del horno, se retira el filtro de la flama y se coloca en el soporte para filtros.

Se saca el crisol del horno con pinzas, se coloca en la arena en un maneral adecuado y se cuela en el sistema de filtración.

Se enfría con agua y se pesa en una báscula el aluminio resultante.

2.3.2 Fusión 02-SF-B-23-0109

Se pesaron 2000 gramos de escoria de aluminio clasificada como UKN.

Se encendió el horno de crisol metálico, de acuerdo con el punto 2.3.0.2

Ya que se ha precalentado el horno se agregó la escoria esperando a que cada carga fundiera para agregar la siguiente y cuidando que no se desbordase, se retiró la nueva escoria generada con el herramental, y se espera la temperatura de trabajo.

Se puso un filtro cerámico, a precalentar en la flama indirecta del horno, se retiró el filtro de la flama y se coloca en el sistema de filtrado.

Se retiró el crisol del horno con unas pinzas y se coloca en la arena en un maneral, se vacía el aluminio resultante en nuestro sistema de filtrado.

Se enfriaron los lingotes en agua, se secaron perfectamente con aire a presión y se pesan en una báscula.

2.3.3 Fusión 03-CF-A-26-0109

Se pesaron 2000 gramos de escoria de aluminio clasificada como UKN.

Se preparó 100g de fundente de acuerdo con el punto 2.3.0.3.

Se preparó el horno de crisol de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Posteriormente se agregó manualmente aproximadamente la mitad del fundente y se esperó a que el aluminio funda, ya fundido el aluminio se agregó la segunda parte del fundente y se mezcla con vigor en el crisol, se dejó reposar el aluminio y se retiró la escoria resultante con el herramental tipo "J" cuidando de no retirar el aluminio de la mezcla y agitando el inferior del crisol para liberar el aluminio atrapado en las escorias más densas. Se dejó reposar nuevamente el aluminio esperando a que las escorias más densas decanten.

Se colocó un filtro cerámico “frió” en el anillo para filtros, justo arriba de la lingotera.

Se sacó el crisol del horno con unas pinzas y colocarlo en la arena con un maneral, se vació el aluminio en el sistema de filtrado.

Se enfrió el lingote con agua, se seco perfectamente con aire a presión y se peso en una báscula.

2.3.4 Fusión 04-CF-A-11-0209

Se pesaron 1540 gramos de escoria de aluminio clasificada como IND.

Se preparó 100g de fundente de acuerdo con el punto 2.3.0.3.

Se preparó el horno de crisol de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Se preparó la fusión de igual manera que en el punto 2.3.3

Se sacó el crisol del horno con unas pinzas y se colocó en la arena con un maneral, se vació el aluminio en el sistema de filtrado.

Se enfrió el lingote con agua, se secó perfectamente con aire a presión y se peso en una báscula.

2.3.5 Fusión 05-CF-A-12-02-0209

Se pesaron 2000 gramos de escoria de aluminio clasificada como IND.

Se preparó 100g de fundente de acuerdo con el punto 2.3.0.3.

Se preparó el horno de crisol de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Se preparó la fusión de igual manera que en el punto 2.3.3

Se saco el crisol del horno con unas pinzas y se colocó en la arena con un maneral, se vació el aluminio en el sistema de filtrado.

Se enfrió el lingote con agua. Se seco perfectamente con aire a presión y se peso en una báscula.

2.3.6 Fusión 06-CF-A-03-0309

Se pesaron 1500 gramos de escoria de aluminio clasificada como IND.

Se preparó 100g de fundente de acuerdo con el punto 2.3.0.3.

Se preparó el horno de crisol de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Se preparó la fusión de igual manera que en el punto 2.3.3

Se midió la temperatura del metal con un termopar tipo "K" con un multímetro marca Mastech, modelo M890G con precisión de 1°C con escala para medir la temperatura en °C.

Se retiró el crisol del horno con pinzas y se colocó en la arena en un maneral, se colocó un filtro cerámico en el soporte y se vació el aluminio en el sistema de filtración.

Se enfrió el lingote con agua, se secó perfectamente con aire a presión y se pesó en una báscula modelo y marca.

2.3.7 Fusión 07-CF-A-25-0309

Se pesaron 1500 gramos de escoria de aluminio clasificada como PRO.

Se preparó 100g de fundente de acuerdo con el punto 2.3.0.3.

Se preparó el horno de crisol de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Posteriormente se agregó la primera carga de la escoria y subsecuentemente se agregó una tercera parte del fundente cuidando que este cubra la escoria y se esperó a que la primera carga se funda, ya fundido se agregó la siguiente carga de escoria y una capa de fundente así hasta llegar a la última carga y terminar con el fundente, posteriormente se mezcló de manera homogénea y se esperó a que el metal y las escorias se separen. Ya separadas se toma el herramental en “J” y se separó la escoria del aluminio de la manera más cuidadosa posible, ya separada se agitó nuevamente el aluminio raspando el fondo para liberar el aluminio atrapado en las escorias más densas y se dejó reposar el aluminio para decantar las escorias más densas.

Se tomó la temperatura con un termopar tipo “K” y un multímetro.

Posteriormente se sacó el crisol del horno con unas pinzas y se colocó en la arena en un maneral, se colocó un filtro cerámico frío en el soporte para el filtro y se vació el aluminio en el sistema de filtrado.

Se enfrió el lingote en agua y se secó perfectamente con aire a presión, se peso en una báscula.

2.3.8 Fusión 08-CF-A-28-0809.

Se pesaron 700 gramos de aluminio de escoria de aluminio clasificada como PRO.

Se prepararon 120g de fundente de acuerdo con el punto 2.3.0.3.

Se preparó el horno de resistencia de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Posteriormente se agregó la primera carga de escoria cuidando de no derramar el contenido y seguidamente se le agrega una parte del fundente, se esperó a que el horno se encontrara a una temperatura de 850° C y se volvió a cargar el resto de la escoria seguidamente del otra parte del fundente, se esperó a que el aluminio funda y se agregó el resto del fundente se mezcló de manera vigorosa raspando con fuerza el fondo para que las escorias mas densas liberaran el aluminio contenido, se dejó reposar la aleación para que las escorias decantaran o flotaran nuevamente y se procedió a retirar las escorias superficiales de manera mecánica con la herramienta en “J” cuidando de no retirar aluminio en el proceso.

Ya limpio el aluminio se procedió a verificar la temperatura de colada con un termopar tipo “K” obteniendo la lectura en un multímetro digital, ya verificada la temperatura de colada o trabajo se retiró el crisol del horno con unas pinzas y se colocó en la arena en un maneral, se vació el aluminio en lingotes usando el filtro cerámico como copa de colada.

Se dejó enfriar en el molde.

Se repite el proceso para las fusiones 09-CF-A-30-0809; 10-CF-A-02-0909.

2.3.9 Fusión 11-CF-A-03-0909.

Se pesaron 700 gramos de aluminio de escoria de aluminio clasificada como EST.

Se prepararon 120g de fundente de acuerdo con el punto 2.3.0.3.

Se preparó el horno de resistencia de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Se cortó un filtro cerámico a una altura de 10 centímetros, y se colocó en el soporte para filtros

Se procedió con la fusión de manera similar a la del punto 2.3.8

Se repite el procedimiento para las fusiones 15-CF-A-09-0909; 16-CF-A-09-0909.

2.3.10 Fusión 12-CF-A-03-0909.

Se pesaron 700 gramos de aluminio de escoria de aluminio clasificada como INU.

Se prepararon 120g de fundente de acuerdo con el punto 2.3.0.3.

Se preparó el horno de resistencia de acuerdo con el punto 2.3.0.2.

Se cortó un filtro cerámico a una altura de 10 centímetros, y se colocó en el soporte para filtros.

Se procedió con la fusión de manera similar a la del punto 2.3.8

Se repite el procedimiento para las fusiones 13-CF-A-04-0909; 14-CF-A-04-0909.

2.4 Toma de muestras.

2.4.1 Muestra para análisis químico.

Las muestras se tomaron de la siguiente manera.

Se realiza una toma de muestra de todas las fusiones. Para las fusiones 01-SF-A; 02-SF-B; 03-CF-A; 04-CF-A; 05-CF-A; 06-CF-A; 07-CF-A, con lingotes prismáticos, se procede de siguiente manera, se corta con una cortadora Buehler 10-1000 el lingote a la mitad se marca un centímetro a partir del borde interno del lingote y se corta con una cortadora nuevamente. Cuidando que el área superficial generada sea mayor de 2cm^2 , posteriormente se devasta con lija fandelli número 100 hasta tener una superficie homogénea y quitando cualquier tipo de contaminante del lingote.

Para las fusiones 08-CF-A; 09-CF-A; 10-CF-A; 11-CF-A; 12-CF-A; 13-CF-A; 14-CF-A; 15-CF-A; 16-CF-A, con lingotes triangulares, se procede de la siguiente manera, se marca el lingote a la mitad, y se miden 2 centímetros de la mitad hacia la derecha y se marca, se miden 2 centímetros de la mitad hacia la izquierda y se marcan, se corta la marca izquierda y derecha con una cortadora y se procede a devastar cualquiera de las superficies más grandes de la muestra con una lija fandelli número 100 hasta tener una superficie homogénea y libre de cualquier tipo de contaminante.

Posteriormente se barrenan las superficies limpias de todas las muestras, hasta obtener 0.1 gramos por muestra, se diluyen agregando ácido clorhídrico 1:1 en volumen en un matraz aforado y se afora a 100 ml con agua destilada.

En la tabla siguiente se muestra el volumen de ácido agregado a las muestras de análisis químico.

Muestra	Volumen de acido.
02-SF-0-23-01	20ml
04-CF-A-11-02	20ml
06-CF-A-16-02	20ml
07-CF-A-25-03	50ml
08-CF-A-28-08	30ml
10-CF-A-02-09	30ml
11-CF-A-03-09	30ml
12-CF-A-03-09	20ml
13-CF-A-04-09	20ml
15-CF-A-09-09	20ml
16-CF-A-09-09	20ml

Tabla 1. Acido Clorhídrico agregado para la dilución de la muestra

2.4.2 Muestras para metalografía.

Se realizó una toma de muestra de las fusiones 01-SF-A; 02-SF-B; 04-CF-A; 07-CF-A; 08-CF-A; 11-CF-A, 12-CF-A. De la siguiente manera se tomó una sección representativa del lingote cortando con una cortadora y se procedió al desbaste como a continuación se describe:

Se toma la muestra y se desbasta con lija fandelli de agua número 240 en una sola dirección hasta obtener una superficie homogénea. Se rota la cara a trabajar de la muestra 90° y se procede a desbastar con lija número 320 en una sola dirección usando agua hasta que las rayas del desbastado anterior desaparezcan y la superficie sea plana. Nuevamente la pieza se rota 90° y se desbasta con lija número 400 en una sola dirección usando agua hasta que las rayas lijado anterior desaparezcan se obtenga una superficie homogénea. A continuación se rota 90°

la pieza y se usa una lija de agua número 600 en una sola dirección hasta que la superficie sea homogénea.

Posteriormente se procede a pulir de manera gruesa cada una de las muestras como a continuación se describe:

Se coloca alúmina de alta pureza con tamaño de partícula de 1 micra en el paño de lona (canvas de Buehler) de la pulidora, se agrega un poco de agua destilada formando una pasta con la alúmina, se coloca la muestra con la cara a pulir en la alúmina y se enciende la máquina de pulir sosteniendo la muestra de manera firme y sin ejercer demasiada presión en esta, se continúa de la misma manera hasta que las líneas del último desbaste se eliminen.

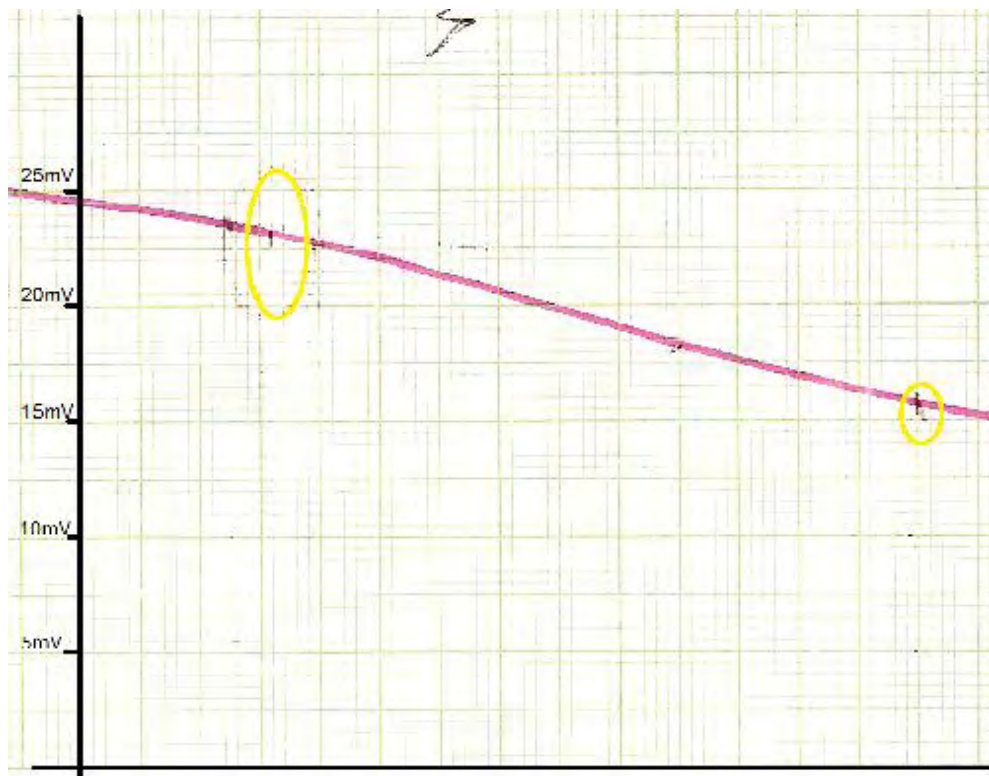
Ya que se ha pulido la muestra de manera gruesa, se procede a pulir de manera fina cada una de las muestras de la siguiente manera:

Se coloca alúmina de alta pureza con grano de 0.3 micras en el paño microcloth (Buehler) de la pulidora colocando agua destilada, y de ésta manera se forma una pasta con la alúmina. Se coloca la muestra con la cara a pulir en contacto con la alúmina y se enciende la máquina de pulir sosteniendo la muestra de manera firme y sin ejercer presión en ésta, de ser necesario se agrega mas agua, se continúa de la misma manera hasta que la muestra quede pulida y se noten pocas o ninguna marca en el microscopio metalográfico óptico a 50x.

Capítulo 3- Resultados y Discusión.

3.1 Curva de Solidificación y Rendimiento de la sales.

A continuación se presentan los resultados de la curva de solidificación del fundente usado en la cual se muestra su rango de solidificación que se encuentra entre 23mV a 16mV correspondientes a 556 °C y 391 °C. La conversión se realizó utilizando una tabla de conversiones para termopar tipo K (5).



Se presenta también el porcentaje de volatilización o rendimiento de la mezcla de sales usada como fundente, los porcentajes fueron obtenidos de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\%Volatilización = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Donde:

P_i = peso inicial del fundente

P_f = peso final del fundente.

Dando como resultado un porcentaje de volatilización promedio de 9%

3.2 Rendimiento de las cargas de escoria.

Se exponen a continuación los porcentajes de recuperación de las escorias de aluminio de acuerdo a su clasificación general y sus promedios de acuerdo al tipo de horno.

Las recuperaciones de aluminio, a partir de sus escorias, se presentan de acuerdo a la ecuación:

$$\%Recuperación = 100 - \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

3.2.1 Recuperación en horno de crisol.

Clasificación de la corrida	Pi (g)	Pf(g)	%Recup.*
01-SF-0-20-01	2000	1155	57.75
02-SF-0-23-01	2000	1070	53.50
02-CF-A-26-01	1861	N/A	N/A
04-CF-A-11-02	1540	920	59.74
05-CF-A-12-02	N/A	N/A	N/A
06-CF-A-16-02	1500	390	26.00
07-CF-A-25-03	1500	935	62.33
Promedio	1733.5	894	51.86

Tabla 2- Porcentaje de recuperación para los experimentos realizados en horno de crisol.

*%Recup. = % de recuperación

3.2.2 Recuperación en horno de resistencia.

Clasificación de la corrida	Pi (g)	Pf(g)	%Recup.
08-CF-A-28-08	700	455	65.00
09-CF-A-30-08	700	358	51.14
10-CF-A-02-09	700	377	53.86
11-CF-A-03-09	700	425	60.71
12-CF-A-03-09	700	455	65.00
13-CF-A-04-09	700	350	50.00
14-CF-A-04-09	700	50	7.14
15-CF-A-09-09	700	555	79.29
16-CF-A-09-09	700	480	68.57
Promedio	700	389.44	55.63

Tabla 3- Porcentaje de recuperación para los experimentos realizados en horno de resistencia.

En general las recuperaciones obtenidas de las escorias de aluminios pueden nombrarse en su mayoría como resultados buenos o factibles, debido en parte a que la materia prima tiene costos menores o que es considerado un material de desecho. Dando como resultado que el costo del procedimiento sea casi en su totalidad dado por el precio de los combustibles y de la mano de obra.

En las tablas 2 y 3 se muestran los porcentajes obtenidos de recuperación para cada corrida y cada horno, en la tablas 2 y 3 se muestra claramente como los porcentajes superan en promedio el 50% de recuperación, sin embargo, es posible notar como algunos resultados están por debajo de ese promedio.

Los casos de la tabla 2 (horno de crisol) son importantes ya que son generadores importantes de experiencias empíricas, lo cual da como resultados casos únicos, se observa en principio una variabilidad en la entrada del peso de las muestras la cual no afecta el porcentaje de recuperación, esta es una variable importante ya que muestra el decrecimiento de la capacidad del crisol en función del número de cargas o corridas que se realizan en este último, dando como resultado que la intermitencia del procedimiento sea mayor debido a la necesidad de mantener el crisol en su mayor capacidad y con un tiempo de vida útil mayor, en la tabla 3 se muestra al igual la capacidad del horno de resistencia el cual no se ve mermado con el paso del tiempo. De manera empírica; el alto contenido de escoria en cada una de las muestras al ser de diferente densidad al aluminio es rechazado por este hacia las paredes y el fondo del crisol, la escoria de menor densidad o aquella que queda atrapada en el fundente es llevada a la superficie del aluminio formando así una costra térmica alrededor del aluminio, por lo tanto, se observa que las temperaturas tomadas en el horno de crisol son mayores a las temperaturas registradas en el horno de resistencia, las cuales contribuyen a que en el horno de crisol no exista realmente un control de la temperatura y este alcance altas temperaturas en relación al horno de resistencia. Lo cual favorece el proceso de difusión de la escoria más densa en el fondo del crisol contribuyendo a la disminución de la capacidad del crisol. Este proceso de formación de la escoria

también favorece el procedimiento de la remoción de la escoria del aluminio ya que este queda con menos impurezas y se tiene una conservación de la temperatura por más tiempo.

Las recuperaciones y pesos finales dados en el horno de crisol (tabla 2) muestran una variación importante teniendo casos con diferentes recuperaciones, que son cercanas al promedio y otras como en el caso específico de los experimentos 02-CF-A-26-01 y 05-CF-A-12-02 que muestran resultados no obtenidos o de baja recuperación en los cuales es importante denotar que cada corrida o batch (bloque de procedimiento) es totalmente independiente de los demás procedimientos. La variación tan importante mostrada en el horno de crisol gran parte es aportada por la costra de escoria que promueve mayores temperaturas y la formación de nueva escoria, así también se agrega el aporte obtenido por la mezcla de gases dentro del horno en contacto con el metal expuesto, lo cual se ve reducido al alcanzar la temperatura de fusión del fundente NaCl – KCl (50-50) e incrementado nuevamente al alcanzar una temperatura en la que el porcentaje de volatilización del fundente es muy alto. Por lo cual, es importante mantener el control de la temperatura para obtener un mejor rango de protección del fundente de NaCl-KCl 50-50.

Las recuperaciones obtenidas en el horno de resistencia (Tabla 3) se muestran más consistentes y cercanos al rango o variación estándar del promedio, al controlar de una manera más efectiva la temperatura, al no tener gases en combustión este es capaz de obtener mejores recuperaciones y un menor número de variables teniendo como principal variable la calidad de la escoria de entrada, tomando en cuenta lo anterior, se debe buscar un método para clasificar las escorias de entrada no solamente por su origen, si no por su tamaño de partícula que influye en la cinética de oxidación o formación de escoria y su origen químico.

Es importante hacer notar que, aún en ausencia de gases, debido a que el material de entrada contiene una cantidad considerable de óxidos o aluminio

combinado con escoria se continua formando la costra de escoria, por lo cual es muy importante realizar trabajo de remoción de esta ultima durante el procedimiento de fundición.

3.3 Análisis Químico

Se muestran las tablas de resultados para los análisis químicos finales de las muestras tomadas (metal recuperado).

Muestra 02-SF-20-01							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	1.13	0.43	0.79	0.62	1.80	0.28	3.90

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.00	2.66	0.02	0.03	0.07	Balance

Tabla 4- Análisis químico para la muestra 02-SF-20-01.

Muestra 04-CF-A-11-02							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	1.05	0.07	0.32	0.63	5.89	0.19	3.89

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.00	2.36	0.02	0.25	0.09	Balance

Tabla 5- Análisis químico de la muestra 04-CF-A-11-02.

Muestra 06-CF-A-16-02							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.07	0.13	0.38	0.06	1.23	0.21	0.26

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.00	0.38	0.00	0.11	0.04	Balance

Tabla 6- Análisis químico de la muestra 06-CF-A-16-02.

Muestra 07-CF-A-25-03							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.08	1.00	0.98	0.06	0.28	0.12	0.31

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.21	0.69	0.00	0.07	0.11	Balance

Tabla 7- Análisis químico para la muestra 07-CF-A-25-03.

Muestra 08-CF-A-28-08							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.08	0.24	1.47	0.04	0.12	0.15	0.18

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.01	0.52	0.00	0.02	0.14	Balance

Tabla 8- Análisis químico para la muestra 08-CF-A-28-08.

Muestra 10-CF-A-02-09							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.074	0.22	1.44	0.04	0.11	0.12	0.16

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.01	0.46	0.00	0.02	0.12	Balance

Tabla 9- Análisis químico para la muestra 10-CF-A-02-09.

Muestra 11-CF-A-03-09							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.07	0.25	1.36	0.04	0.24	0.32	0.17

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.01	0.57	0.00	0.02	0.23	Balance

Tabla 10- Análisis químico para la muestra 11-CF-A-03-09.

Muestra 12-CF-A-03-09							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.03	0.15	1.13	0.03	0.18	0.06	0.10

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.02	0.50	0.00	0.03	0.05	Balance

Tabla 11- Análisis químico para la muestra 12-CF-A-03-09.

Muestra 13-CF-A-04-09							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.04	0.13	1.02	0.03	0.06	0.04	0.09

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.02	0.36	0.00	0.02	0.03	Balance

Tabla 12- Análisis químico para la muestra 13-CF-A-04-09.

Muestra 15-CF-A-09-09							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.03	0.25	1.28	0.03	0.13	0.24	0.09

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.01	0.52	0.00	0.01	0.24	Balance

Tabla 13- Análisis químico para la muestra 15-CF-A-09-09.

Muestra 16-CF-A-09-09							
Elemento	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na
Porcentaje	0.03	0.22	1.92	0.02	0.58	0.69	0.09

Ni	Si	Sr	Ti	Zn	Al
0.01	0.53	0.00	0.03	0.10	Balance

Tabla 14- Análisis químico para la muestra 16-CF-A-09-09.

En relación a los análisis químicos, el no tener una composición de entrada podría representar un problema en relación a la comparativa de los análisis de entrada por salida, sin embargo el realizar un análisis químico previo a la fundición, representa un problema técnico que resulta poco práctico, debido a la heterogeneidad de la muestra en relación a la procedencia ya que se obtienen de diferentes corridas o incluso de diferentes lugares, al igual que la heterogeneidad de los materiales presentes en el material de entrada que llegan a variar entre metales, escorias, arenas de moldeo, cerámicos de moldes, filtros y recubrimientos de los herramientas, por lo cual es necesario considerar que el material de entrada no tiene una composición fija pero que es “rica” en aluminio.

En las tablas de la 4 a la 14 se observa que el aluminio se encuentra por arriba del 85% de la aleación resultante, nótese que el aluminio en las muestras tomadas para horno de crisol se muestra con un menor porcentaje en la aleación, tomando en cuenta lo anterior se puede decir que el aluminio se oxida durante el proceso de fundición dando paso a elementos que son menos activos a esas temperaturas, en relación al horno de resistencia las muestras se notan con un porcentaje de aluminio más constante entre una y otra aleación.

Referente a los otros componentes de la aleación, se muestran el calcio (Ca), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Potasio (K), Magnesio (Mg), Manganeseo (Mn), Sodio (Na), Níquel (Ni), Silicio (Si), Estroncio (Sr) y Titanio (Ti), son propios de la aleación o son agregados con el fundente.

Sin contar a los elementos propios de la aleación que pueden ser modificados mediante balance de carga, es importante hacer notar que el sodio y el potasio en la aleación son elementos indeseables por lo cual se debe tener especial cuidado al momento de retirarlos del metal fundido, ya que en especial el fundente líquido puede abrirse paso en el filtro cerámico, por lo cual es importante no excederse en el uso del fundente.

3.4 Análisis Metalográfico.

Se muestran a continuación las imágenes metalográficas de las muestras representativas de cada colada.

Las imágenes tomadas se hicieron en zonas donde se localizaron acumulación de inclusiones, intermetálicos, porosidades, fases precipitadas (Si, por ejem.), etc. Así como la posible presencia de partículas de escoria.

Metalografía muestra 02-SF-A-23-01.



Imagen 1.0- Escorias, rechupes, poros en aluminio recuperado, las grandes y pequeñas zonas oscuras, Muestra 02-SF-A-23-01, Zona 1, 50x.



Imagen 1.1- Escorias, rechupes, poros en el aluminio recuperado, Muestra 02-SF-A-23-01, Zona 2, 100x

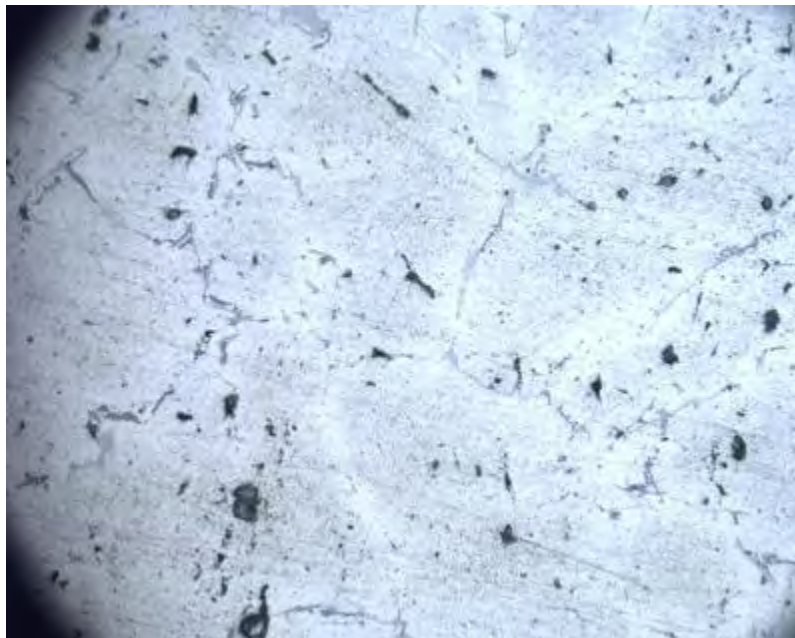


Imagen 1.2- Escorias, poros, intermetálicos en el aluminio recuperado, Muestra 02-SF-A-23-01, Zona 1, 500x.

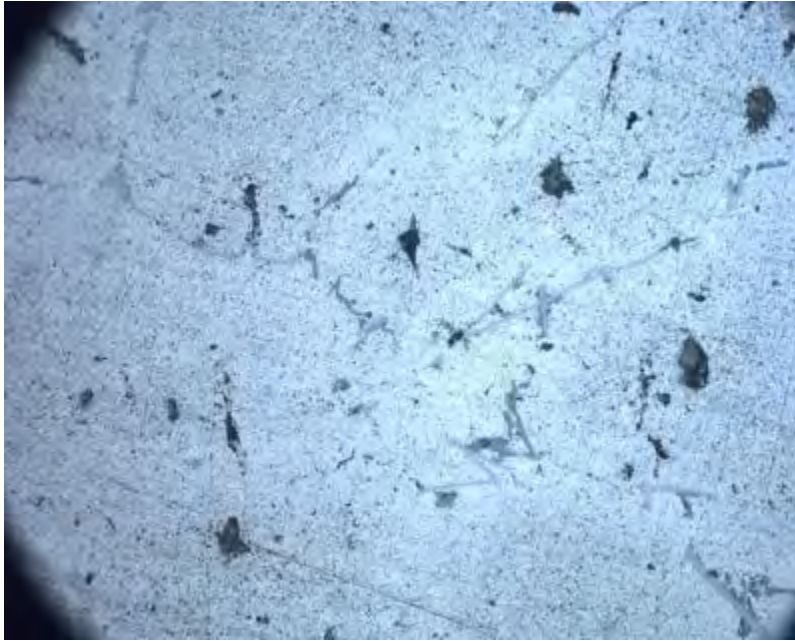


Imagen 1.3- Intermetálicos en el aluminio recuperado, Muestra 02-SF-A-23-01, Zona 1, 1000x.

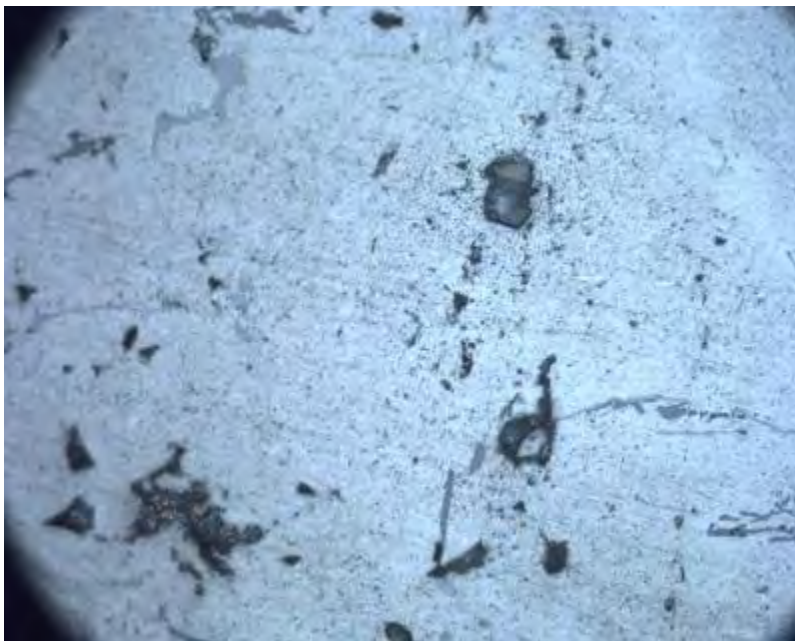


Imagen 1.4- Intermetalicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 02-SF-A-23-01, Zona 2, 1000x.

En las imágenes 1.0 a 1.4 se pueden observar los defectos en la muestra 02-SF-A-23-01, como las escorias, micro-rechupes e intermetalicos, las cuales se ven como pequeños puntos negros dentro de los granos, esta muestra sin el uso del filtro es importante ya que muestra la abundancia de defectos principalmente escorias que se tienen en el aluminio, sin el uso del fundente o filtros para purificarlo de alguna manera, se observan muchos granos pequeños con centros de impurezas, además se muestran algunas impurezas segregadas en los bordes de grano.

En la imagen 1.0 se observan las escorias (grandes manchas negras) en el aluminio son importantes debido a que son el medio de comparación con las muestras que incluyen filtro y fundentes.

En la imagen 1.1 se nota más claramente la abundancia de inclusiones dentro de la matriz metálica, las inclusiones (pequeños puntos negros) se muestran repartidas en toda la matriz mientras que los rechupes (manchas negras) se muestran solo en lugares aislados, sin embargo estos últimos no representan un problema para el acabado final, el cual consiste en lingotes de aluminio secundario o lingotes para su uso como aleaciones madre.

Las imágenes 1.3 y 1.4 son más nítidas e imprescindibles para la confirmación de las escorias en la matriz metálica, en estas se puede ver claramente la forma irregular y el color opaco de las inclusiones dentro de la matriz.

Metalografía muestra 02-SF-B-23-01.

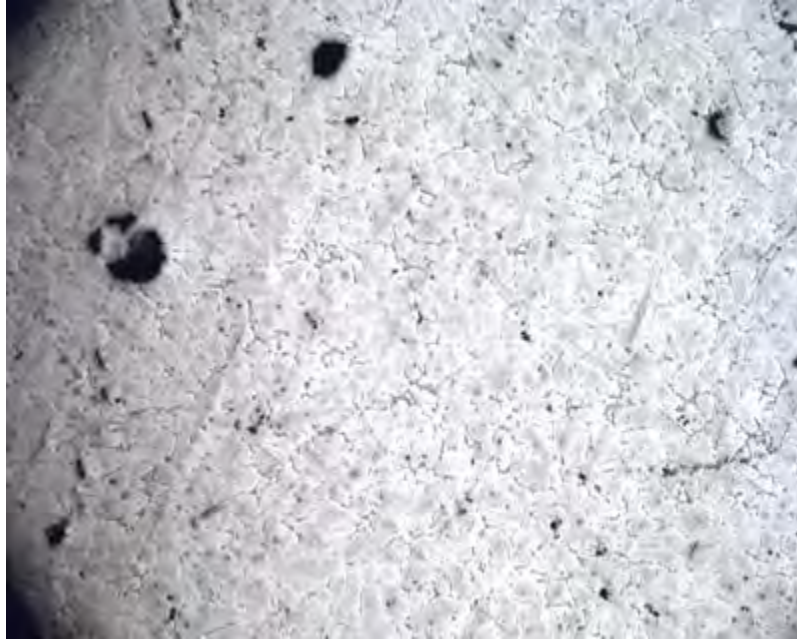


Imagen 2.0- Poros, escorias en el aluminio recuperado, Muestra 02-SF-B-23-01, Zona 1, 50x.

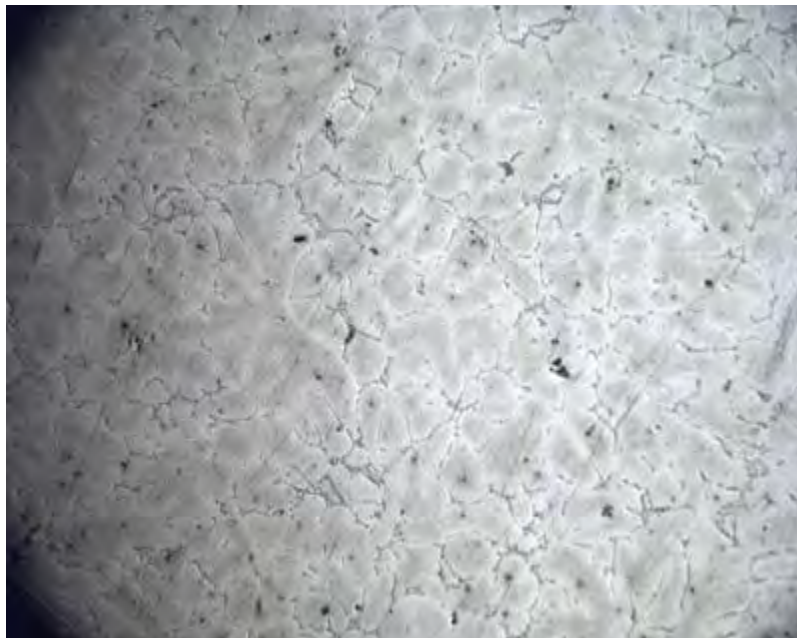


Imagen 2.1- Poros, escorias, intermetalicos en el aluminio recuperado, Muestra 02-SF-B-23-01, Zona 1, 100x.



Imagen 2.2- Intermetálicos en el aluminio recuperado, Muestra 02-SF-B-23-01, Zona 1, 500x.

De las imágenes 2.0 a 2.2, correspondientes a la muestra 02-SF-B-23-01, se puede observar realmente el efecto del fundente en la escoria de aluminio, se muestra una matriz limpia sin la presencia de muchos defectos provenientes de las escorias, se pueden ver bordes de grano mas distanciados, dando una mejor apariencia al metal con una mejor calidad. En las imágenes 2.1 y 2.2 se pueden medir claramente el distanciamiento de las escorias y reconocer claramente los granos, se tiene una mejor comparativa con las imágenes 1.2 y 1.3 y discernir claramente el grado de limpieza de la matriz metálica, sin contar con los rechupes.

Metalografía muestra 04-CF-A-11-02.

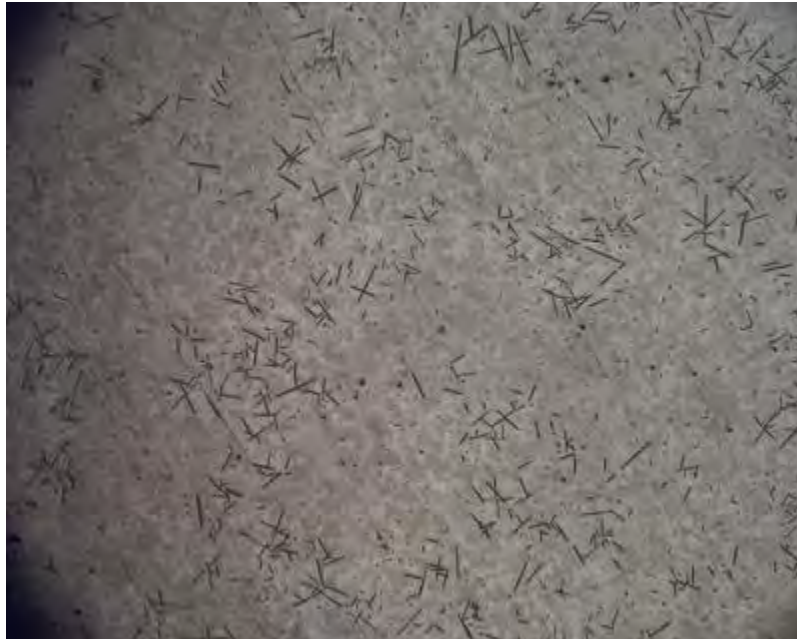


Imagen 3.0- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 04-CF-A-11-02, Zona 1, 50x.



Imagen 3.1- Intermetalicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 04-CF-A-11-02, Zona 1, 100x.

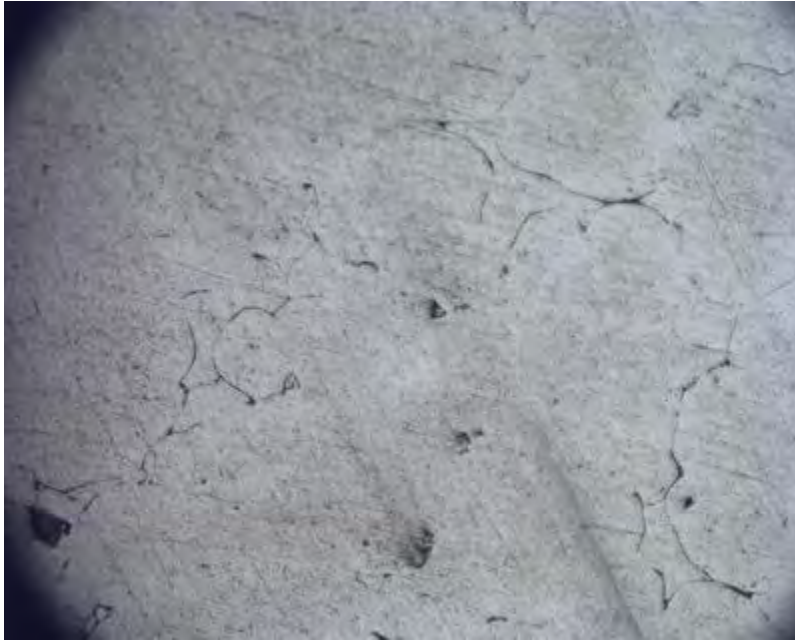


Imagen 3.2- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 04-CF-A-11-02, Zona 1, 500x.



Imagen 3.3- Intermetálicos en el aluminio recuperado, Muestra 04-CF-A-11-02, Zona 2, 500x.

En las imágenes 3.0 a 3.3, pertenecientes a la muestra 04-CF-A-11-02, se observa una muestra con una menor cantidad de intermetálicos, con respecto a las 2 anteriores, el agregado del filtro cerámico durante la colada añade nuevamente una reducción significativa del número de escorias dentro de la matriz metálica, obteniendo un metal con una mejor calidad, reduciendo así las imperfecciones en el aluminio obtenido, en las imágenes 3.2 y 3.3 pueden observarse con mayor detenimiento los intermetálicos y el borde de grano de la matriz.

Metalografía muestra 07-CF-A-25-03.



Imagen 4.0- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 07-CF-A-25-03, Zona 1, 50x.

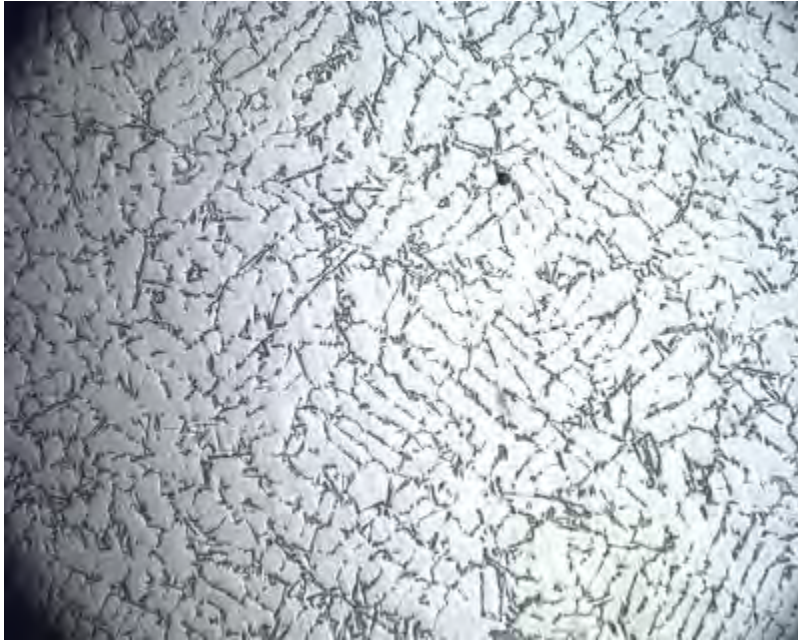


Imagen 4.1- Intermetalicos en el aluminio recuperado, Muestra 07-CF-A-25-03, Zona 1, 100x.

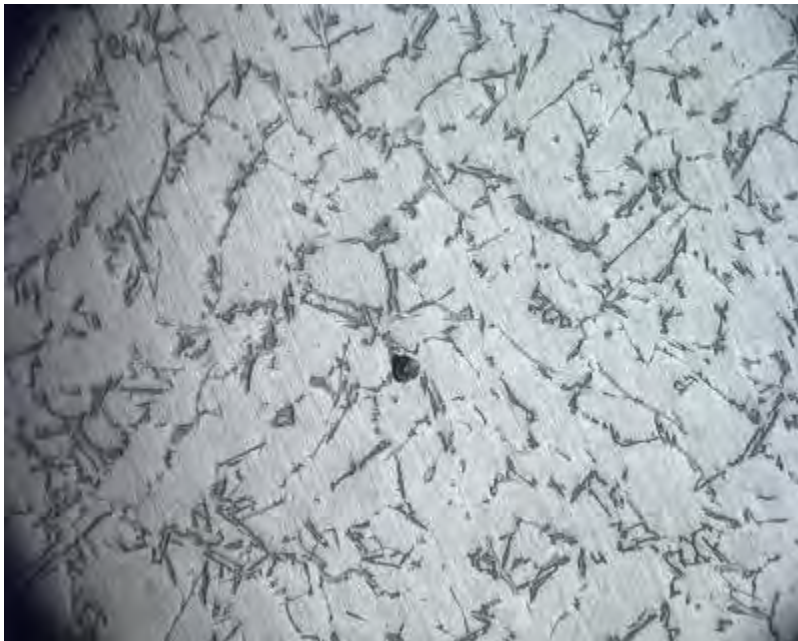


Imagen 4.2-Inclusion en el aluminio recuperado, Muestra 07-CF-A-25-03, Zona 1, 200x.

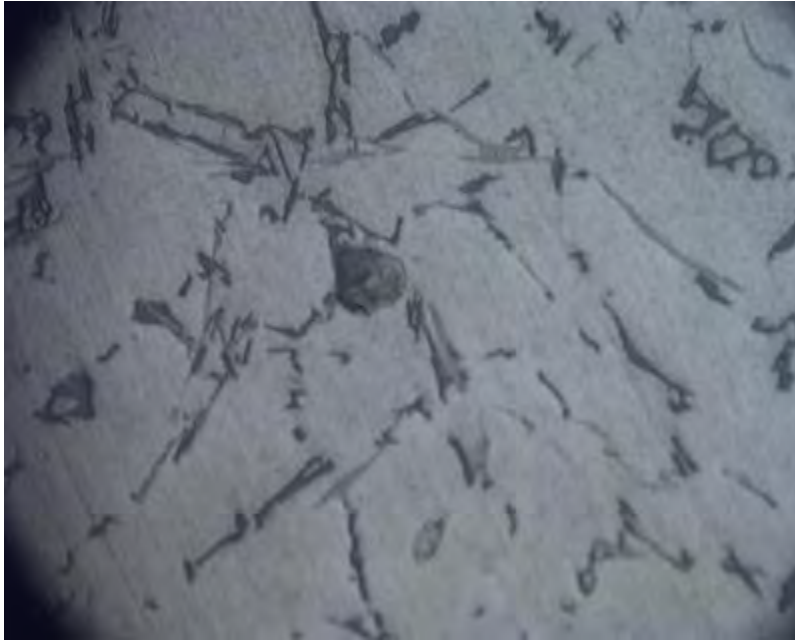


Imagen 4.3-Inclusion en el aluminio recuperado, Muestra 07-CF-A-25-03, Zona 1, 500x.

La metalografías que representan la última corrida en horno de crisol son las imágenes 4.0 a 4.3 de la Muestra 07-CF-A-25-03, es importante identificarlas ya que aunque se muestra una matriz dendrítica (en forma de árbol), en la imagen 4.0 es importante ver que la presencia de escorias es nula a pesar de la poca visibilidad que se tiene debido a la matriz, además se puede observar en aumentos superiores a los 200x la presencia de inclusiones de manera esporádica, dando como resultado una matriz limpia, un aluminio secundario listo para usarse a nivel industrial, comparando la metalografía con la tabla 4, se puede observar que los elementos de aleación son relativamente bajos dejando como aleación principal Al-Cu-Si.

Dentro de las primeras 4 series de metalografías es importante observar que la adición del fundente de KCl-NaCl (50-50) realmente influye dentro de la limpieza del metal, al igual que la colocación de los filtros cerámicos durante la colada reduce de manera significativa las escorias en el aluminio, la combinación de

estas dos técnicas resulta importante en el proceso de recuperación de aluminio a partir de sus escorias.

Metalografía muestra 08-CF-A-28-08.

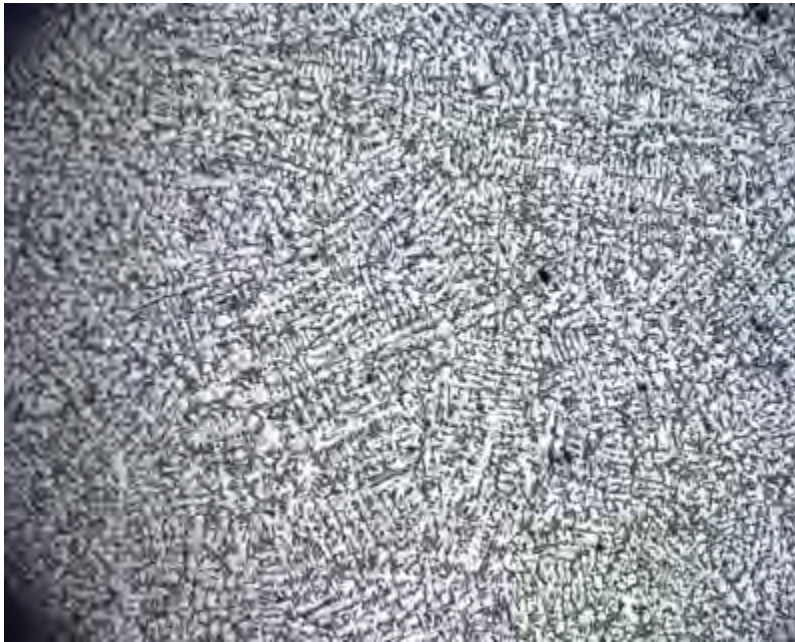


Imagen 5.0- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 08-CF-A-28-08, Zona 1, 50x.

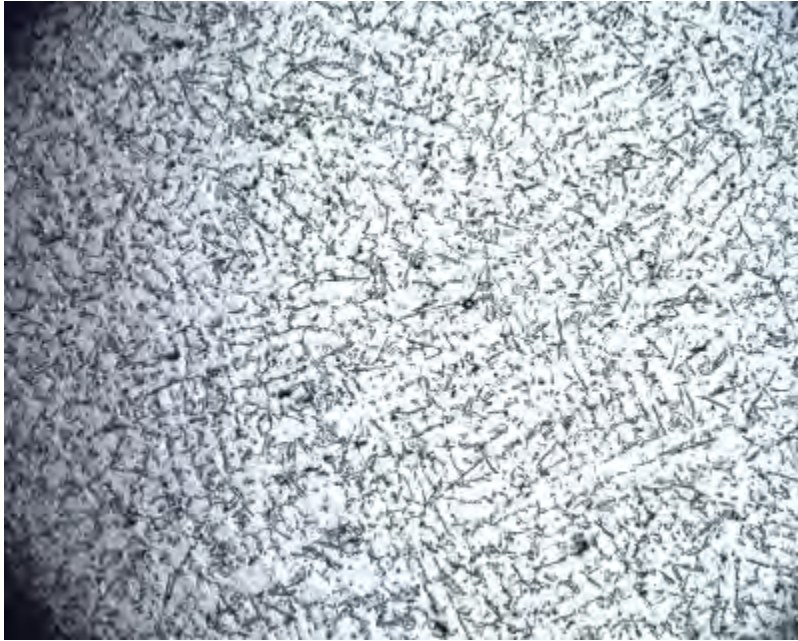


Imagen 5.1- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 08-CF-A-28-08, Zona 1, 100x.

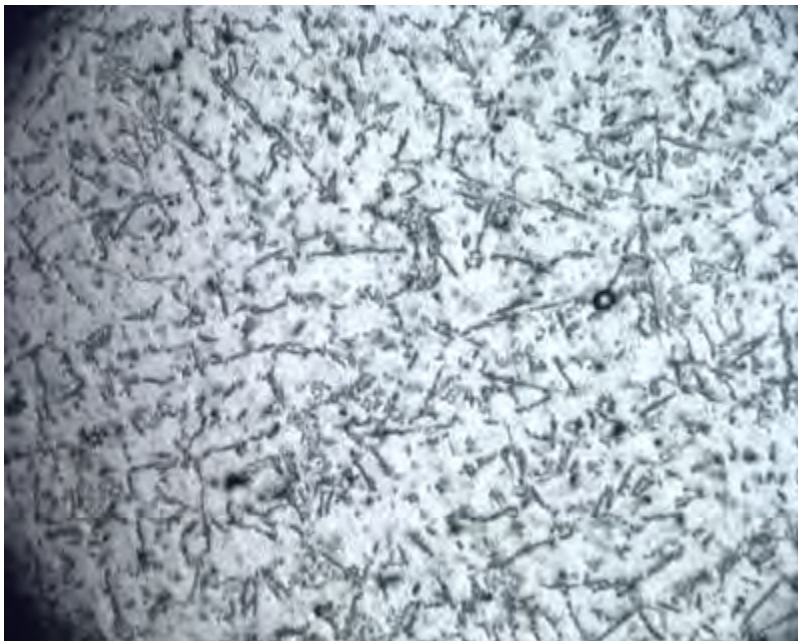


Imagen 5.2- Intermetálicos en el aluminio recuperado, Muestra 08-CF-A-28-08, Zona 1, 200x.

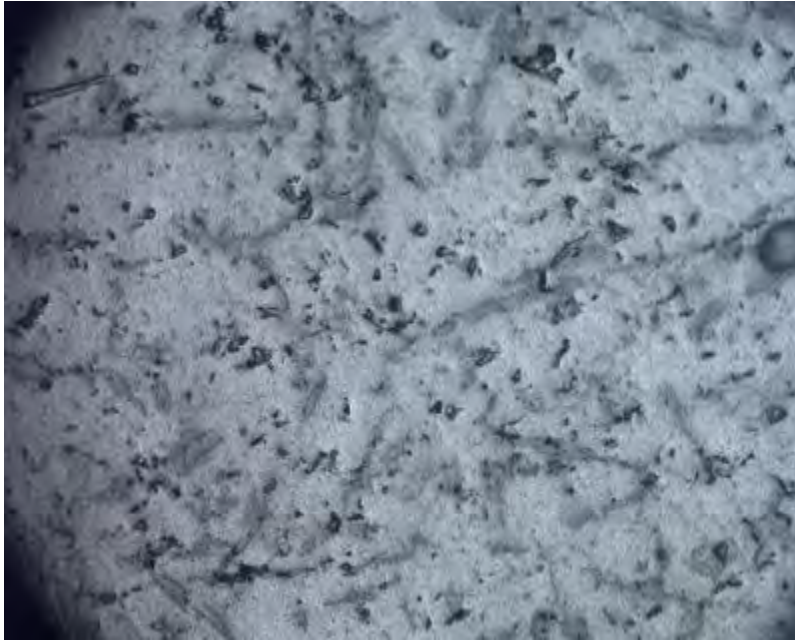


Imagen 5.3- Intermetallicós en el aluminio recuperado, Muestra 08-CF-A-28-08, Zona 1, 500x.

En las imágenes 5.0 a 5.3 se muestran las metalografías para un aluminio tratado en horno de resistencia, con fundente KCl-NaCl y filtrado durante la colada, en las imágenes 5.0, 5.1 y 5.2 se muestra una figura relativamente sana, dentro de la estructura dendrítica se muestran solo algunas inclusiones, sin embargo en la imagen 5.3 con un mayor aumento se muestra dentro de la matriz una serie de micro-inclusiones, que resultan engañosas teniendo como resultado una posible modificación en las propiedades finales.

Es importante observar que este tipo de matrices no sean una constante debido a los esfuerzos residuales en la red.

Metalografía muestra 11-CF-A-03-09.



Imagen 6.0- Intermetálicos, rechupes, poros en el aluminio recuperado, Muestra 11-CF-A-03-09, Zona 1, 50x.



Imagen 6.1- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 11-CF-A-03-09, Zona 1, 100x.



Imagen 6.2- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 11-CF-A-03-09, Zona 1, 200x.



Imagen 6.3- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 11-CF-A-03-09, Zona 1, 500x.

En las imágenes 6.0 a 6.3 se muestra un aluminio limpio con un número de intermetálicos bajo, es importante mencionar que se aunque se usa un

procedimiento muy similar a las muestras de las imágenes 5.0 a 5.4, se obtiene un mejor producto final.

Metalografía muestra 12-CF-A-03-09.



Imagen 7.0- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 12-CF-A-03-09, Zona 1, 50x.

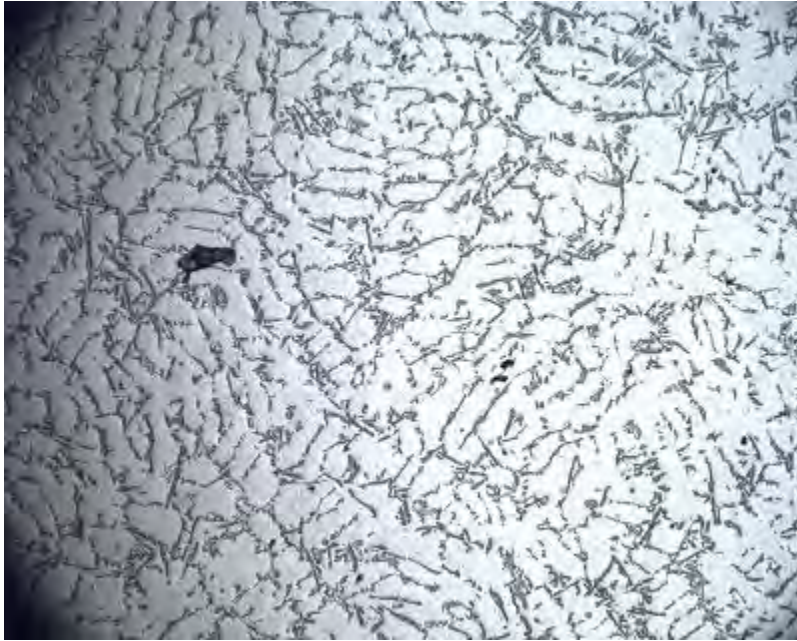


Imagen 7.1- Intermetálicos, poros en el aluminio recuperado, Muestra 12-CF-A-03-09, Zona 1, 100x.

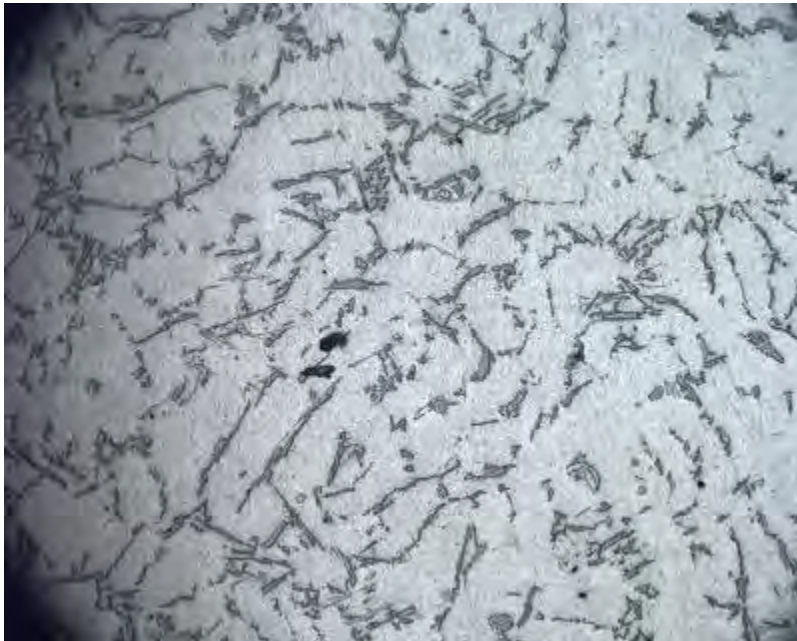


Imagen 7.2- Intermetálicos en el aluminio recuperado, Muestra 12-CF-A-03-09, Zona 1, 200x.

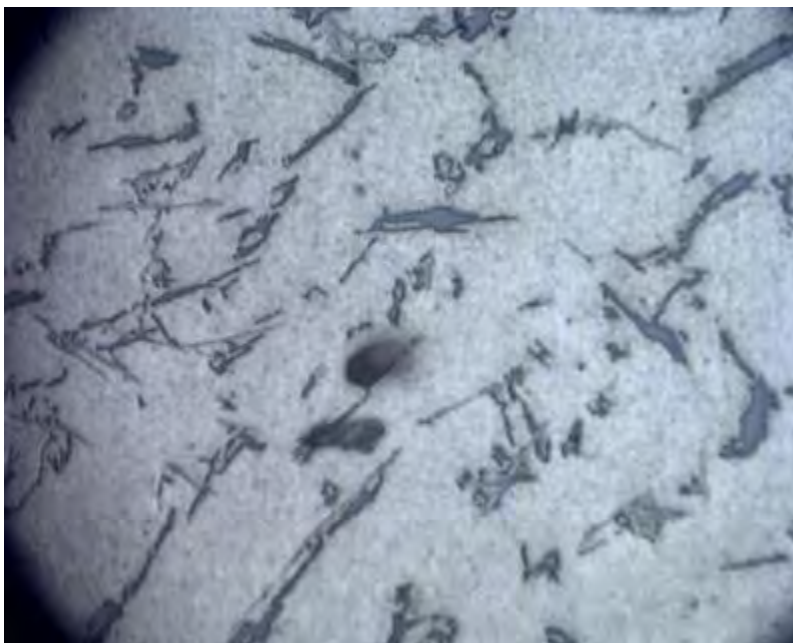


Imagen 7.3- Intermetálicos en el aluminio recuperado, Muestra 12-CF-A-03-09, Zona 1, 500x.

La secuencia de imágenes 7.0 a 7.3 muestra el resultado final del tratamiento de fundición con fundente de KCl-NaCl, claramente se observa un material limpio con pocas impurezas.

En resumen las imágenes 5.0 a 7.3 muestran aluminios de diferentes composiciones químicas iniciales, sin embargo se muestra una mejora continua en el proceso de limpieza o refinamiento del aluminio final obtenido, se podría deducir que realmente al mismo procedimiento se muestra una variación significativa debido a la adquisición de experiencia empírica del fundidor, es importante resaltar esta parte debido a que realmente muchas escorias obtenidas como principal materia prima en estos experimentos proceden de diferentes fundiciones con diferentes niveles en el manejo de la técnica, por lo cual es importante sugerir una mayor experiencia en el manejo o retiro de escorias para obtener un mejor resultado final en el manejo del aluminio secundario.

En conjunto las recuperaciones, los análisis químicos y metalografías, se conjugan para determinar la practicidad de la recuperación del aluminio con fundente de KCl-NaCl, en general se muestra una mejora continua con respecto al método de fundición y colada simple, aunque el uso de fundentes en la industria de la fundición es una práctica común, el uso de estos últimos no pareciera necesario en el reciclaje de aluminio debido a la premisa de que las escorias de aluminio son realmente basura industrial, sin embargo dentro de la experimentación es posible demostrar que este fundente en particular es realmente un prerrequisito esencial para obtener un metal de mejor calidad.

La manipulación de filtros cerámicos en la industria empieza a ser una práctica normal, y en este trabajo fue un método esencial, al ser un auxiliar en la colada y pudiendo dejar en manos no experimentadas el retiro de la escoria para así obtener buenos resultados.

El uso de hornos de crisol y de resistencia, muestra la viabilidad del método en pequeñas industrias, ya que no requiere la implementación de nuevo equipo dentro de la fábrica, el uso del fundente y filtros no representa mayor problema en la capacitación del personal de la fundición.

Capítulo 4- Conclusiones

- Las sales fundentes tienen un efecto positivo en el tratamiento de las escorias de aluminio por el método de fundición obteniéndose un aluminio con mejor calidad (sin escorias) y mayor recuperación.
- El filtro cerámico como auxiliar en la colada de aluminio recuperado muestra un efecto positivo en la remoción de escorias que por métodos mecánicos y manuales son difíciles de retirar.
- El horno de resistencia muestra una recuperación levemente mayor a la recuperación mostrada por el horno de crisol, sin embargo, ambos hornos muestran una recuperación aceptable en la recuperación de aluminio de escorias de aluminio.
- En conjunto el uso de sales fundentes y filtros cerámicos en hornos de resistencia es una buena opción en el reciclaje de aluminio a partir de sus escorias, ya que muestra un buen rendimiento y maniobrabilidad, en comparación a la combinación de sales fundentes, filtro y hornos de crisol.

Capitulo 5- Bibliografía y Referencias.

- Enciclopedia del Aluminio, tomo 1- Producción del Aluminio, Autores: Pierre Barrant y Robert Gadeau, 1967, Ediciones Urmo, pags. 29-33.
- Aluminium Handbook, tomo 2 – Forming, Casting, Surface Treatment, Reciclyng and Ecology, first edition, Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, ISBN 3-87017-262-2, 2003, pags. 543-633.
- Aluminio y sus Aleaciones, Frank King, Limusa, Primera Edición, México, 1992, ISBN 0-7458-0013-0, Pags 19-27, 184-186.
- Aluminium and Aluminium Alloys, ASM Specialty Handbook, ASM internacional, USA, 1993, ISBN 0-87170-496-X, Pag, 3, 88
- Handbook of Aluminium, Volume 2 – Alloy Production and Materials Manufacturing, edited by George E. Totten & D. Scott MacKenzie, Marcel Dekker Inc., USA, 2003, ISBN 0-8247-0896-2, Pags 118-133.
- Pagina de cotizaciones bursatiles del London Metal Exchange, al 30 de septiembre de 2009, <http://www.lme.co.uk>
- Industrial Furnaces, Volumen 1, W. Trinks y M. H. Mawhinney, Wiley & Sons, 1962, USA, Pags 1-5, 70-73
- Foundry Engineering, Howard F. Taylor, Merton C. Flemmings & John Wulff, Wiley & Sons, 1969, USA, ISBN 0-471-84843-3, pags 301-314

- Foundry Technology, Peter Beeley, segunda edicion, Butterworth Heinemann, India, 2001, ISBN 0-7506-4567-9, pags 245-246, 39-43.
- <http://www.made-in-china.com/showroom/ceramic-foam-filter/product-detailCePEQJqdgLVu/China-Molten-Metal-Filter.html> (25-Julio-2010)
- http://www.tower-packing.com/ceramic/ceramic_foamed_casting_filter.htm (25-Julio-2010)
- (1) <http://www.sapiensman.com/ESDictionary/docs/d12.htm> (25-Julio-2010)
- (2) http://en.wikipedia.org/wiki/File:Electric_Arc_Furnace.png (25-Julio-2010)
- (3) http://www.bikudo.com/product_search/details/121494/silicon_carbide_ceramic_foam_filter_sic_foam_filter.html (25-Julio-2010)
- (4) <http://www.king-in-china.com/ckprod.asp?id=4> (25-Julio-2010)
- (5) <http://www.thermometrics.corp.com/thertypk.html> (Junio-2009)