



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

***ESTUDIO DE LA DISMINUCIÓN DE ESCORIA Y SU CONTENIDO METÁLICO EN
EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ALEACIONES COMERCIALES BASE
ALUMINIO PARA COLADA A PRESIÓN A PARTIR DE CHATARRA EN
“INDUSTRIAL LIGAS METÁLICAS”***

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

ANDRÉS MÉNDEZ CERVANTES



MÉXICO, D.F.

2012

JURADO ASIGNADO:

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

VOCAL: Profesor: Dr. José Alejandro García Hinojosa

SECRETARIO: Profesor: I.Q.M. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

1er. SUPLENTE: Profesor: M.I. Agustín Gerardo Ruíz Tamayo

2° SUPLENTE: Profesor: M.I. Luis Darío Escobar Mejía

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

- **INDUSTRIAL LIGAS METÁLICAS S.A. DE C.V.**
- **LABORATORIO DE INGENIERÍA DE FUNDICIÓN Y PLANTAS PILOTO, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.**

ASESOR DEL TEMA: DR. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

SUPERVISOR TÉCNICO: I.Q.M. EDUARDO HERNÁNDEZ TINOCO

SUSTENTANTE (S): ANDRÉS MÉNDEZ CERVANTES

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Este trabajo y la alegría que provoca, se lo dedico totalmente a mis padres, Andrés y Alma, que debido a su cariño y esfuerzo he logrado concluir ésta etapa de mi vida. Gracias, por su amor, sacrificios, ayuda incondicional, consejos y enseñanzas; ahora me toca a mí retribuirles de alguna manera todo esto.

Agradecimientos a mi familia: Astrid, Blanca, Janete, Carlos, Aline, Lorena, Pablo, etc; que directa o indirectamente siempre me han apoyado en todos los aspectos, son parte importante de mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Química, en especial, al Departamento de Ingeniería Metalúrgica, por la oportunidad de desarrollarme académica y profesionalmente.

A mis profesores, gracias por compartir sus conocimientos y brindarme su apoyo; Dr. Alejandro García Hinojosa, Ing. Arturo Sánchez Santiago, Ing. Cándido Atlatenco T., Ing. Ignacio Beltrán Piña, M. en I. Agustín Ruíz Tamayo, Ing. Juan Manuel de la Rosa Canales, M. en C. Antonio Huerta Cerdán, etc.

A mi asesor técnico, Ing. Eduardo H. Tinoco, gracias por brindarme su amistad, apoyo, enseñanza y muchos consejos.

A Industrial Ligas Metálicas: Sr. Rafael López Martín, Gabriel López Martín, Ing. Omar Beltrán Guerrero, Ing. Luis Suari, Lic. Roberto Espinoza, Ing. Gregorio Perdomo, Charlie, Josefina, etc. Gracias por todos los apoyos y facilidades; y por brindarme la oportunidad de realizar mi tesis y trabajar con ustedes.

A mis amigos y compañeros, que siempre han estado ahí, sé que cuento con ustedes, gracias por su amistad y por haber hecho muy amena ésta etapa, son parte muy valiosa de mi vida: Jorge, Arnoldo, Páez, Oscar, David, Edgar, Azucena, Mónica, Anna, Karla, Paola, Viridiana, Carlos, Carlos David, Kuri, Wiener, George, Gaby, etc.

Al lector:

Este trabajo fue realizado con mucho esmero y cariño, espero que te sea de utilidad; si al leerlo aprendes algo nuevo, me sentiré sumamente satisfecho.

"No basta saber, se debe aplicar; no basta querer, se debe hacer"
Wolfgang von Goethe

INDICE

Contenido	Página
Resumen	1
Introducción	2
Objetivos	4
Hipótesis	4
Capitulo 1 Antecedentes teóricos	
1.1 Descripción del proceso de producción de Industrial Ligas Metálicas	5
1.1.1 Aleaciones fabricadas	5
1.2 Horno de reverbero	6
1.2.1 Mecanismo de calentamiento de la chatarra	7
1.2.2 Combustión	10
1.3 Práctica de fundición que se lleva a cabo	10
1.4 Aleaciones de colada a presión	12
1.4.1 Efectos de aleantes	12
1.4.2 Características de la aleación 380.0	13
1.4.3 Descripción general del proceso de colada a presión	13
1.5 Comportamiento fisicoquímico del aluminio	14
1.6 Formación de escorias de aluminio	16
1.7 Prevención, control y tratamiento de escorias de aluminio	21
1.7.1 Preparación de chatarra	21
1.7.2 Introducción de chatarra al horno	21
1.7.3 Prácticas de fundición	21
1.7.4 Procesos de recuperación de aluminio a partir de escoria	22
Capitulo 2 Procedimiento experimental	
2.1 Procedimiento experimental.	23
2.2 Evaluación del rendimiento metalúrgico y la escoria producida para la producción de aleaciones a partir de chatarra, en el proceso de fundición convencional.	25
2.3 Evaluación del contenido metálico en la escoria generada en fusiones donde no se utilizo fundente escorificante.	26
2.4 Técnica de fusión.	26
2.5 Evaluación del rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de producción de aleaciones a partir de chatarra implementando la técnica de fusión propuesta.	27
2.6 Evaluación del contenido metálico en la escoria producida en el proceso de producción implementando a la nueva técnica de fusión.	28

Capitulo 3 Resultados	
3.1	Evaluación del rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de fundición convencional y en el proceso de fundición implementando la técnica de fusión sugerida. 29
3.2	Efecto del tipo y proporción de chatarra procesada sobre el rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de fundición convencional. 31
3.3	Efecto del tipo y porcentaje de chatarra procesada sobre el rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de fundición empleando la técnica de fusión propuesta. 33
3.4	Tiempos y Movimientos aplicando la Técnica de Fusión. 34
3.5	Análisis de la escoria. 35
3.6	Evaluación del contenido metálico en la escoria generada en fusiones donde no se utilizó fundente escorificante. 37
3.7	Evaluación del contenido metálico en la escoria generada en fusiones donde se utilizó fundente escorificante. 38
Capitulo 4 Análisis de Resultados	
4.1	Evaluación del rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida los procesos de fundición convencional, y sugerido implementando la técnica de fusión. 40
4.2	Análisis de la escoria 45
4.3	Determinación del contenido metálico en la escoria 46
Capitulo 5 Conclusiones	
5.1	Conclusiones 47
Apéndices	
	Apéndice 1. Oxidación de los elementos disueltos en el aluminio 48
	Apéndice 2. Determinación de la cantidad optima de material “blando” que se debe agregar al metal líquido. 50
	Apéndice 3. Determinación de los parámetros de proceso 50
	Bibliografía 51

Tablas

1.1	Contenidos máximos y mínimos (% en peso) para los principales elementos de la aleación "380"	5
1.2	Contenidos máximos y mínimos (% en peso) para los principales elementos de la aleación "Al-Si9-Cu3"	5
1.3	Relación Área _{superficial} /masa [cm ² /g] para materiales blandos y macizos	10
1.4	Propiedades mecánicas de la aleación 380.0	13
2.1	Equipo utilizado en planta	24
3.1	Relación de la cantidad y tipo de materia prima procesada, productos obtenidos y rendimientos en el proceso de fundición convencional	29
3.2	Relación de la cantidad y tipo de materia prima procesada, productos obtenidos y rendimientos en el proceso de fundición implementando la técnica de fusión propuesta	29
3.3	Control de la apertura de los quemadores y tiempos de operación para la implementación de la técnica de fusión	34
3.4	Contenido metálico en la escoria generada en fusiones sin utilizar fundente.	37
3.5	Contenido metálico en la escoria generada en fusiones donde se utilizó fundente.	38
4.1	Apertura y potencia de los quemadores	43
4.2	Tipos de escoria producida	45
4.3	Composición química del fundente escorificante utilizado	46

Gráficas

3.1	Rendimiento de la chatarra en función de la materia prima procesada considerando el contenido ferroso. Comparación entre el proceso convencional y el proceso propuesto.	30
3.2	Rendimiento metalúrgico en función del contenido de aluminio en la chatarra, el contenido de aluminio en la chatarra se define como: Contenido de aluminio en la chatarra = Materia prima procesada - material ferroso. Comparación entre el proceso convencional y el proceso propuesto.	30
3.3	Cantidad de escoria generada en función del contenido de aluminio en la chatarra, el contenido de aluminio en la chatarra se define como: Contenido de aluminio en la chatarra = Materia prima procesada - material ferroso. Comparación entre el proceso convencional y el proceso propuesto.	31
3.4	Rendimiento metalúrgico en función del porcentaje de chatarra procesada en el proceso de fundición convencional.	32
3.5	Cantidad de escoria producida en función del porcentaje de chatarra procesada en el proceso de fundición convencional.	32
3.6	Rendimiento metalúrgico en función del porcentaje de chatarra procesada implementando la técnica de fusión propuesta.	33
3.7	Cantidad de escoria producida en función del porcentaje de chatarra procesada implementando la técnica de fusión propuesta.	34
3.8	Determinación del contenido metálico en la escoria producida en el proceso de producción convencional.	38
3.9	Determinación del contenido metálico en la escoria producida en el proceso de producción implementando la técnica de fusión.	39

3.10	Comparación entre el contenido metálico porcentual en la escoria procedente del proceso de fundición sin emplear fundente y la escoria obtenida del proceso de fundición empleando fundente.	39
------	--	----

Figuras

1.1	Horno de reverbero basculante	6
1.2	Esquema de un horno de reverbero de hogar húmedo	7
1.3	Esquema de un horno de reverbero de hogar seco	7
1.4	Materia prima que presenta una relación $\text{Área}_{\text{superficial}}/\text{masa} < 1$ denominada "macizo".	11
1.5	Materia prima que presenta una relación $\text{Área}_{\text{superficial}}/\text{masa} > 1$ denominada "blando".	11
1.6	Lingote con relación $\text{Área}_{\text{superficial}}/\text{masa} < 1$	12
1.7	Esquema de una maquina de inyección de cámara fría	14
1.8	Energía libre de formación de óxidos en función de la temperatura	14
1.9	Crecimiento del oxido sobre una muestra de aluminio expuesta a flama directa	17
1.10	Temperatura critica de escoriado	18
1.11	Efecto del contenido de Mg y la temperatura de trabajo sobre el peso ganado a través de la oxidación	19
1.12	Efecto del espesor de la chatarra y el tipo de aleación en la perdida del metal	20
1.13	Eficiencia de recuperación en función de la proporción de fundente	22
2.1	Diagrama del procedimiento experimental llevado a cabo para realizar ésta tesis.	23
3.1	Carga y distribución del material "blando" en el horno	33
3.2	"Turrón" de escoria sobrecalentada.	35
3.3	Escoria con alto grado de sobrecalentamiento.	35
3.4	Escoria granular "seca".	35
3.5	Escoria con alto contenido ferroso.	36
3.6	Escoria "húmeda".	36
3.7	Escoria sobrecalentada dentro del horno .	36
3.8	Escoria sobrecalentada.	36
3.9	Escoriado manteniendo la apertura de los quemadores con alta intensidad.	37
3.10	Muestras representativas de escoria.	37
	Diagrama de Ellingham para la formación de óxidos, de los principales elementos aleantes en las aleaciones de aluminio	49

Actualmente los procesos de manufactura de componentes metálicos por fundición, han tomado gran importancia en el desarrollo de la industria del país. Dentro de ésta, los principales componentes se fabrican con aleaciones base aluminio. Estos materiales combinan alta resistencia mecánica con baja densidad y costo.

En México los minerales de aluminio no son adecuados para su beneficio y posteriores tratamientos metalúrgicos de extracción y refinación; por lo que en el mayor de los casos el aluminio primario debe importarse. Sin embargo en las últimas décadas, la demanda de aluminio aleado se ha visto satisfecha por procesos de reciclado de componentes cuyo ciclo de vida útil ha terminado (chatarra).

Estos procesos de reciclado para obtener lo que se conoce como aluminio “secundario”, además de ser generosos con el medio ambiente, utilizan aproximadamente del 5 al 10% de la energía requerida para transformar la mena en aluminio primario (aproximadamente 58 GJ por tonelada). El proceso de reciclado de chatarra de aluminio consiste en clasificar, acondicionar la chatarra, para posteriormente fundirla, alear y vaciar en lingoteras o moldes para obtener la pieza final. Cada una de estas etapas es crucial, para obtener la composición química requerida en el producto final. Una clasificación ineficiente, aunado a la fusión de chatarra en condiciones inadecuadas, afectaran la recuperación metálica, con pérdidas de metal, contaminación del mismo y elevación de costos de producción.

Un factor que se presenta en todos los procesos de transformación de materiales es la merma. Esta consiste en la pérdida inevitable de los insumos durante sus procesos de transformación a productos, debido a la naturaleza misma del proceso. Esta fracción de insumo transformado como merma es un subproducto que no posee las características ni el concepto comercial del producto mismo y que no se puede tratar por el mismo proceso para obtener nuevamente el producto. En los procesos metalúrgicos de fundición de chatarra de aluminio, la merma se identifica con la escoria. Ésta es una mezcla heterogénea de aluminio, óxidos y otros compuestos (nitruros, boruros, carburos, etc.) de éste y de otros elementos disueltos en él, así como también rastros de fundentes y metales contaminantes no disueltos, principalmente.

La escoria depende de varios factores para su formación. Desde una inadecuada clasificación y acondicionamiento de la chatarra, hasta el tipo de horno, la temperatura de trabajo, el manejo del metal, entre otros. Si se toman en cuenta medidas para minimizar los efectos de estos factores en el proceso de fundición de chatarra, la recuperación metalúrgica y el rendimiento del proceso pueden aumentar de gran manera, repercutiendo en la producción y costos.

El aluminio combinado con otros elementos no se puede recuperar, lo que afecta financieramente a la producción. Existen procesos para recuperar el aluminio libre que ha quedado atrapado en la escoria, sin embargo una buena práctica de fundición debe contemplar la máxima recuperación metalúrgica y minimizar la formación de escoria.

México es un importante productor de componentes metálicos manufacturados por procesos de fundición. La producción nacional de partes metálicas a partir de aleaciones base aluminio, representa cerca del 8% de la producción mundial. Los principales procesos de manufactura para componentes de aluminio son la fundición, el conformado mecánico y la pulvimetalurgia.

Los procesos de manufactura por fundición consisten en introducir la aleación líquida, con la composición química requerida, a un molde que le dará la forma final al solidificar. Durante la solidificación, se forma la microestructura de la aleación y se definen sus características asociadas a parámetros como la presencia de aleantes e impurezas, la velocidad de solidificación, el tratamiento en fase líquida, etc., ésta microestructura define las propiedades mecánicas, químicas y físicas, que requiere el producto final.

Los principales métodos de obtención de piezas por fundición son la fundición en arena en verde, fundición en molde permanente y fundición por inyección ó colada a presión. Éste último método ha tenido un rápido progreso durante los últimos años debido a que se pueden fabricar componentes complejos, con alta precisión dimensional y buen acabado superficial.

La demanda de aleaciones base aluminio en México se satisface con el tratamiento de chatarra. Éste es un proceso de transformación que consiste en la clasificación de la chatarra, su acondicionamiento (limpieza y separación de agentes nocivos), fusión, procesos de aleado y de colada. Estos procesos en conjunto requieren un consumo de energía relativamente bajo, en comparación con el proceso de extracción y refinación para obtener aluminio electrolítico. La energía total necesaria para procesar la chatarra representa solo del 5 al 10% de la energía requerida en los procesos Bayer y Hall-Heroult. Por lo tanto el reciclado de chatarra es mucho más barato y menos complejo que los procesos de extracción y refinación. Además es un proceso benéfico para el medio ambiente.

Dentro de los procesos de transformación de materias primas a productos, una parte de estas se transformara eficientemente al producto requerido, la parte restante se convierte en subproducto formando parte de la merma. Por lo tanto se pueden definir tres parámetros para medir la eficiencia del proceso. El rendimiento de la chatarra representa el porcentaje de metal ganado a partir de la masa total procesada. El rendimiento metalúrgico se define como la relación porcentual de metal obtenido como producto a partir del metal contenido en la chatarra. La merma metalúrgica, “escoria”, es la pérdida física en peso ocasionada por factores intrínsecos de la materia prima o debido a los procesos de transformación.

En los procesos pirometalúrgicos, como la fabricación de aleaciones a partir de chatarra, la merma metalúrgica se identifica con la escoria. Esta consiste en aluminio metálico y mezclas de óxidos y otros compuestos así como inclusiones refractarias o metálicas. Los factores que contribuyen a la formación de la escoria varían de acuerdo al proceso de tratamiento que se le da a la materia prima, pero en general son los siguientes:

- Tipo de chatarra.
- Condiciones de la chatarra.
- Tipo de horno.
- Mecanismo y eficiencia de calentamiento de la chatarra.

- Atmósfera reductora/oxidante en contacto con la chatarra.
- Temperatura de trabajo.
- Tiempo de permanencia del metal en el horno.
- Turbulencias en el metal.

Al controlar cada factor se puede minimizar considerablemente la merma. Sin embargo en algunos casos es necesario invertir en infraestructura, como en el caso del acondicionamiento de la chatarra. Existen procesos de pretratamiento de chatarra que la acondicionan adecuadamente para su fusión, retirando contaminantes que favorecen la formación de escoria. Implementando prácticas adecuadas de fusión, como la inmersión de chatarra con espesores delgados (por ejemplo materiales procedentes de conformado mecánico) al metal líquido a una temperatura óptima, se pueden reducir las pérdidas de metal en la escoria. El retiro continuo de la escoria sobrecalentada, también ayuda a lograr éste objetivo. Estas prácticas no requieren de inversión en infraestructura y se pueden implementar de manera inmediata en el proceso de fundición.

En el presente trabajo se determinó el rendimiento, y la merma en el proceso de producción de Ligas Metálicas, ya que no se planea invertir en infraestructura para limpieza y acondicionamiento de chatarra a corto plazo; se diseñó e implementó una técnica de fusión, que se basa en la incorporación de materiales con relaciones $\frac{\text{Área}_{\text{superficial}}}{\text{masa}} > 1$ por inmersión en un baño líquido previamente formado con materiales donde esta relación es menor a uno.

Objetivos

1. Evaluar el rendimiento y la merma metalúrgica en el proceso fundición convencional de “Industrial Ligas Metálicas”.
2. Evaluar y comparar el contenido metálico en la escoria al utilizar fundente y sin utilizarlo
3. Diseñar una técnica de fusión eficiente para la fundición de chatarra de aluminio.
4. Evaluar el rendimiento y la merma metalúrgica en el proceso de fundición al implementar la técnica de fusión propuesta.

Hipótesis

- La chatarra con relaciones *área superficial/masa* > 1 genera mayor cantidad de escoria en comparación con la chatarra con relaciones *área superficial/masa* < 1 .
- La chatarra con relaciones *área superficial/masa* > 1 en contacto directo con la flama de los quemadores sufre mayor oxidación que la chatarra con relaciones *área superficial/masa* < 1 .
- La incorporación por inmersión de la chatarra con relaciones *área superficial/masa* > 1 a un baño metálico previamente formado y a una temperatura adecuada generara mayor rendimiento metalúrgico y menor cantidad de escoria.
- El retiro continuo de escoria sobrecalentada disminuye las perdidas de metal.
- Movimiento mecánico adecuado en la escoria libera el metal atrapado.

1.1 Descripción del proceso de producción de Industrial Ligas Metálicas

El reciclado de aluminio es importante debido a varias razones económicas y ambientales. Por ejemplo el reciclado de 1 Kg de latas de bebida ahorra hasta 8 Kg de bauxita, 4 Kg de productos químicos y 14 KWH de electricidad (International Aluminum Institute. 2007). De éste proceso de obtienen materiales de alta calidad.

La empresa para la que se realizó éste proyecto, procesa chatarra para producir aleaciones comerciales base aluminio por el proceso de tratamiento de chatarra. La aleación de aluminio que se produce es 380.1, cuyo destino principal es la manufactura de piezas por colada a presión (Die Casting) para la industria automotriz. La chatarra se somete a un proceso de selección y clasificación donde se separan los materiales de aluminio de los componentes nocivos para su procesamiento (partes de plástico, acero, hierro, zinc y bronce principalmente). Una vez separada la chatarra se preparan las cargas para alimentar el horno. Se carga la chatarra al horno y una vez que se ha vuelto líquido, se ajusta la composición química con aleantes. Cuando se obtiene la composición química adecuada de la aleación, el metal se vierte en lingoteras.

1.1.1 Aleaciones fabricadas

Se procesa chatarra para producir aleaciones comerciales base aluminio clase 380 en forma de lingotes. Las dos aleaciones producidas son variantes de la aleación 380.0. En el proceso de producción interno las aleaciones que se producen se denominan "380" y "Al-Si9-Cu3", estos nombres se asignan por la especificación del cliente.

Las composiciones químicas de las aleaciones producidas se muestran en las tablas 1.1 y 1.22.

Tabla 1.1 Contenedos máximos y mínimos (% en peso) para los principales elementos de la aleación "380".

(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 1.2 Contenedos máximos y mínimos (%en peso) para los principales elementos de la aleación "Al-Si9-Cu3".

(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

1.2 Horno de reverbero

En la planta se cuenta con un horno de reverbero de hogar húmedo (Figura 1.1), acondicionado con dos quemadores dispuestos longitudinalmente y con capacidad para 7 toneladas de aluminio líquido. El horno es la unidad donde se lleva acabo la fusión de chatarra, escoriado y ajuste de la composición química. La mayoría de la chatarra de aluminio reciclada actualmente se procesa en hornos alimentados por combustibles líquidos y con gas natural.

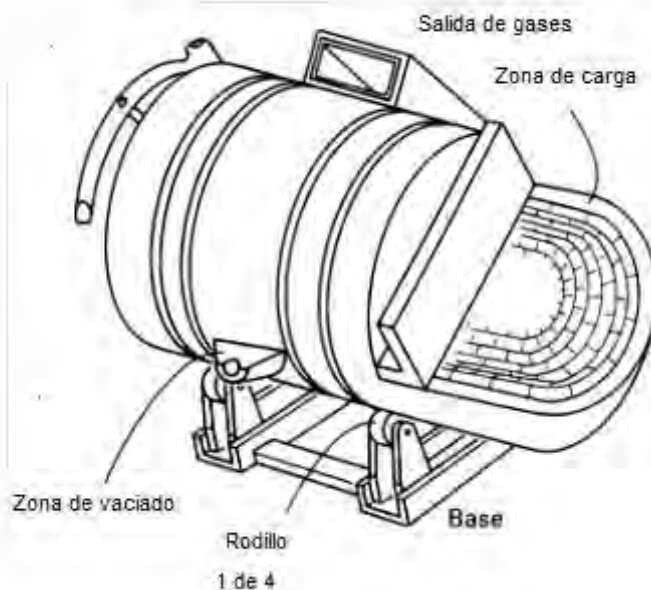


Figura 1.1 Horno de reverbero basculante (ASM Metals Handbook Volume 15 Casting).

Los hornos de reverbero se clasifican principalmente en dos tipos. Los hornos de hogar húmedo, donde los productos de combustión se encuentran en contacto directo con la superficie de la carga metálica, y la transferencia de calor se lleva a cabo por radiación y convección (Figura 1.2).

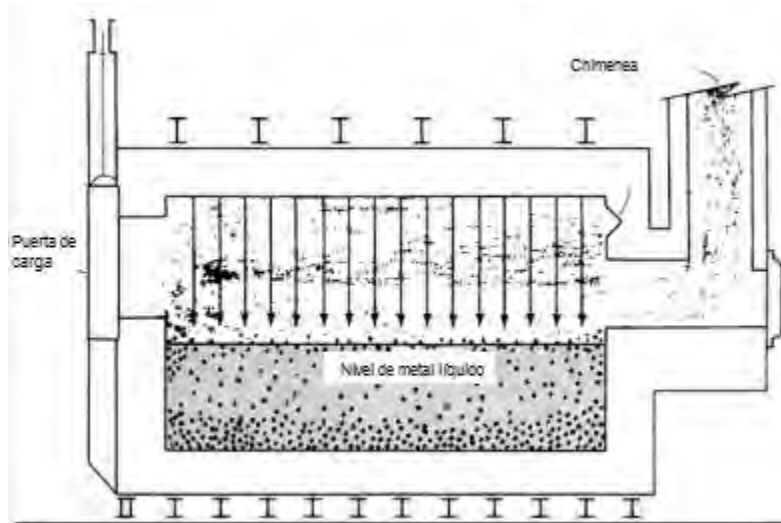


Figura 1.2 Esquema de un horno de reverbero de hogar húmedo (ASM Metals Handbook Volume 15 Casting).

En un horno de hogar seco (Figura 1.3) la carga se coloca en un lugar con pendiente sobre el nivel de metal líquido, la carga está completamente envuelta por los gases. La carga sólida se funde y el metal líquido pasa a una cámara de mantenimiento, donde se refina y alea.

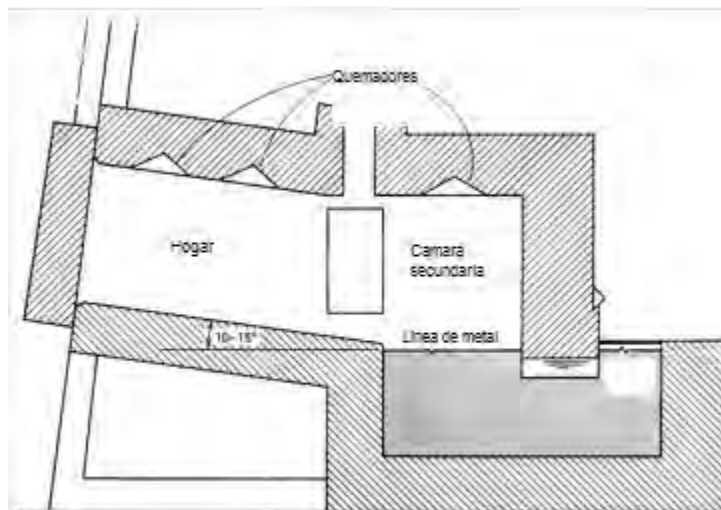


Figura 1.3 Esquema de un horno de reverbero de hogar seco (ASM Metals Handbook Volume 15 Casting).

1.2.1 Mecanismo de calentamiento de la chatarra

El proceso de fundición de chatarra se puede definir en tres etapas, calentamiento, fusión y etapa final. Se definen tres regiones principales en el horno: La región I comprende la atmósfera del horno, formada por gases de combustión y aire; la región II está formada por la chatarra sólida y la atmósfera y en la región III coexiste la chatarra sólida con la líquida. Conforme pasa el tiempo la región II se reduce e incrementa la región III hasta que toda la chatarra es inmersa en el baño metálico. Durante la etapa final coexiste el líquido con la atmósfera.

Cuando la energía radiante incide sobre la superficie de la chatarra parte de la radiación se refleja, otra más se absorbe y otra parte se puede transmitir. Otra fracción importante se transfiere hacia las paredes del horno y de estas hacia el metal, parte del calor que incide en las paredes se pierde. El calor incide sobre el aluminio; éste puede reverberar entre el metal y las paredes antes de ser absorbido por el primero; el aluminio refleja el calor mucho mejor que otros metales. Como resultado, los hornos de reverbero cuentan con niveles de metal líquido poco profundos, lo que maximiza el área superficial respecto a la masa metálica. Debido a esto aumenta el flujo de energía térmica hacia el lecho metálico, pero existe mayor contacto superficial con la atmósfera oxidante, y en consecuencia aumentan las pérdidas de metal.

El calor es transferido desde la flama a través del mecanismo de transporte de calor de radiación. Este fenómeno se describe por la ecuación de Stephan-Boltzman:

$$q_s = \sigma T_f^4$$

Donde q_s representa el flujo de calor en W , σ es la constante de Stephan-Boltzman ($5 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$) y T_f es la temperatura de flama. La radiación representa el 80% de la transferencia de calor en un horno típico de reverbero.

El aumento de la temperatura de la flama es importante en el incremento de la rapidez de transferencia de calor por radiación. Sin embargo las superficies expuestas directamente a la fuente de radiación reciben la mayoría de calor, el metal más cercano a la flama se calienta mucho más rápido que el metal que se encuentra más alejado. Esto causa sobrecalentamiento y una excesiva oxidación, en consecuencia la pérdida de metal y la formación de escoria aumentan.

Los gases producidos por la combustión y el nitrógeno presente en el aire se calientan y transfieren su calor por convección. La rapidez de transferencia de calor por convección se describe por la ley de enfriamiento de Newton:

$$q_s = h(T_g - T_s)$$

Donde q_s nuevamente se refiere a la rapidez de transferencia de calor por unidad de área de material sólido ó baño metálico, T_g y T_s son las temperaturas del gas en contacto con la superficie y del sólido respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor por convección h , es un parámetro que se encuentra en función de la composición, presión, temperatura y características del flujo de gas; valores típicos para condiciones de fundición son de 10 a 30 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$. Altas presiones de gas aumentan el valor de h , lo que hace eficiente el calentamiento. Sin embargo la turbulencia que se forma en la superficie del metal líquido causada por el gas, puede atravesar las capas de escoria y exponer la capa de metal a la oxidación.

Una vez que el calor se ha transferido a la superficie del metal sólido, el transporte se da desde la superficie hasta el seno de la chatarra. En el metal líquido esto se lleva a cabo en parte por convección.

La expresión que describe la transferencia de calor por conducción por unidad de área de la superficie de metal esta dada por la Ley de Fourier:

$$q_s = k/L(T_{sup} - T_{sen})$$

Donde k es la conductividad térmica del metal, L es la profundidad de metal, T_{sup} es la temperatura en la superficie y T_{sen} es la temperatura en el seno de metal líquido o la carga sólida. La conductividad térmica del aluminio sólido es más alta que la del líquido, pero esta se reduce en las cargas de chatarra debido a los espacios vacíos que se forman. El lecho de chatarra metálica es considerada como un medio pseudo-poroso donde la chatarra y los espacios entre ella están uniformemente distribuidos. Asumiendo esto se puede considerar un mecanismo de transporte de calor por conducción a través de un medio poroso. La forma y la distribución al azar de los espacios pueden tomarse en cuenta por un factor de porosidad δ_g . Por lo que la ecuación anterior toma la siguiente forma en un balance de energía:

$$\rho_{ef} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_{ef} \nabla^2 T - \rho_{ef} L \frac{\partial f_l}{\partial t}$$

Donde T es la temperatura de la chatarra, L es el calor latente, f_l es la fracción transformada a líquido, ρ_{ef} es la densidad efectiva, tomada como:

$$\rho_{ef} = \rho(1 - \delta_g)$$

Donde δ_g es la fracción porosa (espacios vacíos entre la chatarra). La conductividad térmica efectiva k_{ef} es una función de δ_g , C_p , el calor específico del aluminio, la conductividad térmica del aluminio sólido k_s y del coeficiente de conductancia térmica A_c , de modo que en la región sólido-gas se tiene:

$$k_{ef} = A_c k_s (1 - \delta_g)$$

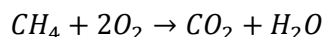
El coeficiente de conductancia térmica es un número adimensional entre 0 y 1 que toma en cuenta el contacto térmico no perfecto entre la chatarra, y la transferencia de calor por convección del gas en los espacios vacíos hacia la chatarra; su valor se determina experimentalmente y depende del tipo de chatarra y su grado de compactación dentro del horno. En general la mayoría de las chatarras son compactadas, el valor del primer factor es alto debido a que aumenta el contacto de la compactación, mientras que el segundo factor disminuye debido a los espacios más pequeños que disminuyen la transferencia de calor por convección. Cuando el metal líquido gotea hacia la región fundida la conductividad térmica efectiva se convierte en la conductividad térmica del metal líquido y desaparecen las porosidades.

La conductividad térmica de la escoria es baja y la transferencia de calor a través de ésta limita la rapidez de calentamiento del metal. Debido a que el calor es irradiado directamente a la superficie, la temperatura de esta es mayor que la del resto del metal.

Si la conducción es el principal mecanismo de transferencia de calor, los gradientes de temperatura pueden ser muy severos, con diferencias de temperaturas entre la parte superior y el fondo del metal de 100°C o incluso mayores. Puesto que la temperatura y la composición son fijas, la agitación es el método más efectivo para incrementar el coeficiente h .

1.2.2 Combustión

Muchos hornos de reverbero queman gas natural para suministrar la energía requerida para fundir. El gas natural consiste en su mayoría en metano (CH_4) con algo de etano (C_2H_6) y butano (C_4H_{10}). Estos hidrocarburos reaccionan con el oxígeno del aire produciendo dióxido de carbono y vapor de agua de acuerdo a la siguiente reacción:



La energía producida por esta reacción eleva la temperatura de los gases producidos, a la temperatura de la flama. Es la radiación de la flama y el calor transferido por los gases calentados lo que calienta y vuelve líquida la chatarra. El nitrógeno presente en el aire absorbe gran parte del calor de reacción, por lo que la temperatura de flama es relativamente “baja”, menor de 2000 ° C. Para esto se puede utilizar aire enriquecido con oxígeno.

1.3 Practica de fundición que se lleva a cabo

La materia prima que se procesa en la planta se clasifica de acuerdo a la relación $\frac{A_{\text{superficial}} [\text{cm}^2]}{m [\text{g}]}$, donde $A_{\text{superficial}}$ se refiere a la suma de las áreas superficiales de las piezas que conforman la chatarra y que mantienen contacto con la atmosfera oxidante; m se refiere a la masa de la pieza. La tabla 1.3 indica los valores de ésta relación para algunos materiales.

Tabla 1.3. Relación área superficial/masa [cm^2/g] para materiales “bandos” y “macizos”.

Material		Sección longitudinal [cm]	Ancho 1 [cm]	Ancho 2 [cm]	Diámetro [cm]	Área superficial [cm^2]	Masa de la pieza [g]	A superficial/masa
Blando	Perfil	90	10	4.5	0	2610	704.7	3.7
	Lamina	110	40	0	0	8800	2373	3.7
	Tubo	100	1.5	0	1.5	471.2	63.6	7.4
Macizo	Pistón	9.5	0	0	6	207.3	404.9	0.5
	Barra	20	5	5	0	450	1350	0.3
	Lingote	45	15	10	0	2250	18225	0.1

De manera interna, en la planta, se le denomina “macizo” (Figura 1.4) a los materiales cuya relación $A_{\text{superficial}}/m < 1$, esto quiere decir que la masa de éste tipo de chatarra es mayor que el área de contacto con la atmósfera oxidante. Corresponden a éste tipo de chatarra los materiales cuyo origen de manufactura es fundición o pulvimetalurgia, es decir pistones, motores, piezas eléctricas, etc. Este tipo de chatarra puede estar cubierta de grasa y contener algunas partes de acero.



Figura 1.4 Materia prima que presenta una relación $\frac{\text{Área}_{\text{superficial}}}{\text{masa}} < 1$, denominada "macizo".

El material "blando" (Figura 1.5) corresponde a los materiales cuya relación $A_{\text{superficial}}/m < 1$, esto quiere decir que la masa de éste tipo de chatarra es menor que el área de contacto con la atmosfera oxidante. Corresponden a este tipo de chatarra los materiales cuyo origen de manufactura es el conformado mecánico, es decir perfiles, alambres, láminas, etc. Estos materiales pueden estar recubiertos con pinturas, baños electrolíticos y grasa.

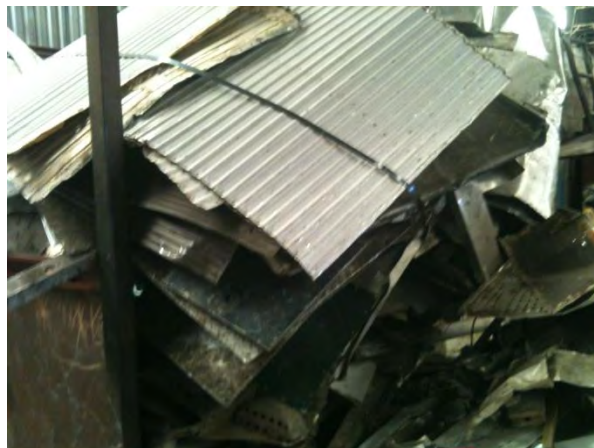


Figura 1.5 Materia prima que presenta una relación $\frac{\text{Área}_{\text{superficial}}}{\text{masa}} > 1$, denominada "blando".

El lingote de aluminio (Figura 1.6) es un tipo de materia prima que no contiene rastros de hierro o recubrimientos, éste proviene de procesos de recuperación a partir de escoria principalmente, ó bien en menor medida de procesos de obtención de aluminio primario. Éste tipo de materia prima presenta una relación $\frac{\text{Área}_{\text{superficial}}}{\text{masa}} < 1$ y aporta gran cantidad de masa a la fusión.



Figura 1.6 Lingote, presenta una relación $\frac{\text{Área}_{\text{superficial}}}{\text{masa}} < 1$.

El proceso de fundición comienza precalentando el horno durante una hora. No se cuenta con medidores de temperatura funcionando, sin embargo se estima (por mediciones anteriores) que la temperatura de la bóveda, utilizando los quemadores con 100% de apertura, se encuentra aproximadamente a 1600°C.

Una vez que ha transcurrido este tiempo se alimenta el horno con la materia prima. Generalmente se comienza cargando el “macizo” y el lingote, seguido del “blando”. Una vez que ocurre la transformación a líquido se adiciona fundente escorificante comercial en una proporción de 1 Kg de fundente por cada tonelada de metal líquido en el horno, se agita y se retira la escoria.

1.4 Aleaciones para colada a presión

La principal familia de aleaciones base aluminio utilizada para producir componentes por inyección, son las aleaciones Al-Si. De estas las aleaciones clase 380.0, constituyen cerca del 85% de la producción de piezas por inyección. Estas aleaciones combinan bajos costos con resistencia mecánica adecuada, resistencia a la corrosión, alta fluidez que se requiere para el llenado eficaz del molde y baja adherencia a éste.

1.4.1 Efecto de aleantes.

Los principales aleantes en la aleación 380.0 son el Si, Cu, Fe y Mg. El cobre proporciona resistencia mecánica y dureza. Altos contenidos de cobre (4-10%) mejoran la respuesta al tratamiento térmico. Sin embargo reduce la resistencia a la corrosión, la colabilidad y la resistencia a la fractura en caliente. El hierro mejora la resistencia a la fractura en caliente y minimiza la tendencia de adhesión de la pieza al molde. Reduce la ductilidad y junto con el Mn y Cr forman “lodos” en el metal. El magnesio mejora la respuesta al tratamiento térmico, el cual provee dureza y resistencia mecánica. Forma fases endurecedoras como el Mg₂Si. El contenido de Mg se mantiene a un nivel bajo para evitar la oxidación.

El silicio mejora las características de colada, favorece la fluidez, la resistencia a la fractura en caliente y la colabilidad. La cantidad óptima depende del proceso de fundición; para procesos de enfriamiento lento (molde de arena) de 5-7%, para molde permanente de 7-9% y para inyección a presión de 8-12%. El silicio eutéctico forma fases equiaxiales o en forma de hojuelas durante la

solidificación, las cuales están embebidas en una matriz blanda de aluminio. Esto junto a la alta velocidad de solidificación, característica de los procesos de colada a presión, confieren las propiedades mecánicas características de estas aleaciones.

1.4.2 Características de la aleación 380.0.

Las propiedades de éstas aleaciones se controlan mediante endurecimiento por solución sólida de la matriz α con endurecimiento por dispersión de la fase β y con la solidificación rápida, que controla el tamaño y la morfología del grano.

La adición de Si produce partículas de silicio elemental y una solución sólida rica en aluminio, en ausencia de otros elementos. La solubilidad de silicio en aluminio es baja. También es común encontrar rastros de hierro como impureza que viene de los procesos de refinación y fundición.

La mayoría de los remanentes de hierro permanecen en la solución sólida hasta que la reacción eutéctica ocurre y se forman compuestos intermetálicos que son partículas con estructura monoclinica. Los más comunes son Al_5FeSi en forma de agujas, $Al_5(Fe, Mn)_2Si_{13}$ en forma de cuboides (lodos), Al_8FeMg_2Si conocidos como "escritura china" (*chinise scrip*). Los primeros perjudican las propiedades mecánicas, los lodos afectan el proceso de inyección al molde y los intermetálicos con forma de "escritura china" no afectan las propiedades mecánicas.

En general las aleaciones de aluminio poseen una alta relación $\frac{\text{Resistencia mecánica}}{\text{Densidad}}$. Las propiedades mecánicas de la aleación 380.0 se presentan en la tabla 1.3. Se utilizan principalmente en la fabricación de componentes para la industria eléctrica y automotriz.

Tabla 1.4 Propiedades mecánicas de la aleación 380.0

Esfuerzo a la tensión= 330 MPa
Esfuerzo a la fluencia= 165 MPa
Elongación= 3% en 50 mm

1.4.3 Descripción general del proceso de colada a presión.

La colada a presión es un proceso de manufactura en el que se producen componentes metálicos de geometría compleja a través de moldes reutilizables denominados dados, el proceso involucra el uso de un horno, la máquina de inyección y los moldes. La velocidad de inyección es de alrededor de 20 a 70 m/s, los tiempos de llenado son muy cortos. Las principales ventajas de este proceso son: una alta producción, alta precisión en las dimensiones de las piezas, buen acabado superficial y obtención de piezas delgadas, también se requiere un mínimo maquinado posterior.

El proceso de colada a presión se lleva a cabo de dos maneras, inyección por cámara caliente en la cual el compartimento de fusión se encuentra en la maquina de inyección. Esta se utiliza para trabajar con metales de bajos puntos de fusión como el zinc. En la inyección por cámara fría la unidad de fusión se encuentra fuera de la maquina de inyección. Las aleaciones de aluminio se inyectan en este tipo de maquinas (Figura 1.7).

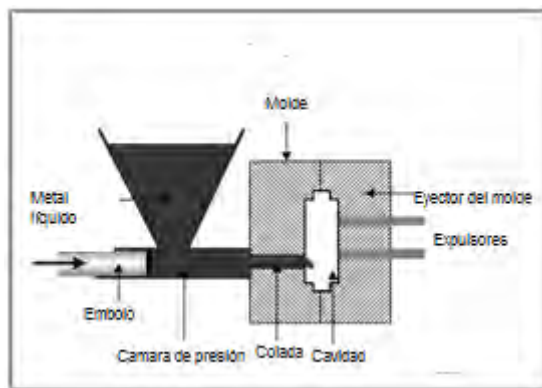


Figura 1.7 Esquema de una maquina de inyección de cámara fría.

1.5 Comportamiento fisicoquímico del aluminio

El aluminio y sus aleaciones poseen una alta afinidad para reaccionar con el oxígeno. Los principales aleantes son Si, Cu, Fe y Mg, de acuerdo al diagrama de Ellingham para la formación de óxidos (Figura 1.8), el potencial químico de formación del Al_2O_3 es muy bajo.

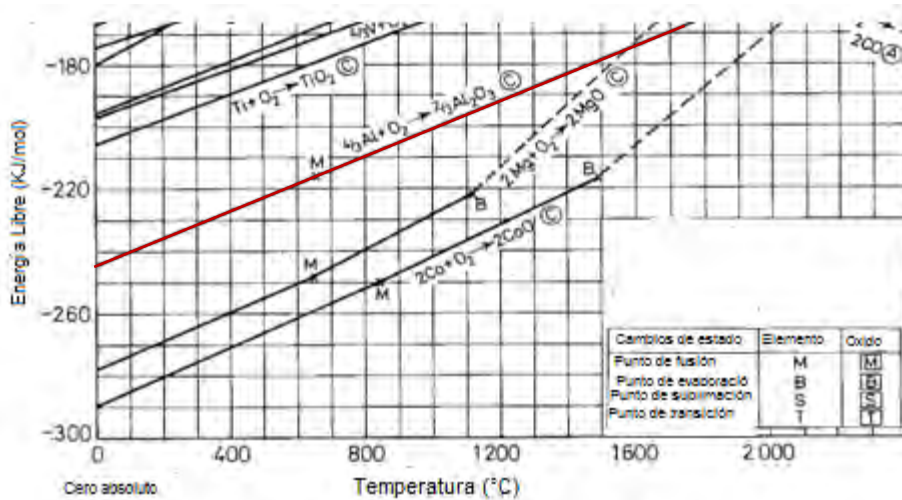
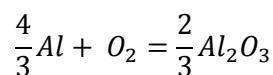


Figura 1.8 Energía libre de formación de óxidos en función de la temperatura. La formación del Al_2O_3 a la temperatura de trabajo ($\sim 700^\circ\text{C}$) es de $-213 \text{ Kcal mol}^{-1}$ (De Richardson and Jeffes, Iron and Steel Institute).

La energía libre de formación de la alúmina (Al_2O_3) es de $-213 \text{ Kcal mol}^{-1}$, debido a este valor la constante de equilibrio favorece la formación del óxido.



$$K = \frac{a_{Al_2O_3}^{2/3}}{a_{Al}^{4/3} p_{O_2}}$$

De estas consideraciones energéticas, la oxidación de una superficie de aluminio tanto sólido (a 25°C la energía libre es aproximadamente de -245 Kcal mol⁻¹) como líquido es instantánea. La estabilidad termodinámica de la alúmina incrementa cuando la temperatura decrece, así que la reacción de oxidación ocurre automáticamente en el aluminio cuando se enfría. Se requiere una presión parcial en la atmósfera mínima de 10⁻⁴³ KPa para que ocurra la reacción. Esta reacción es muy exotérmica y libera 399 Kcal mol⁻¹.

El Fe, Zn, Cu y Si son elementos menos reactivos que el aluminio y termodinámicamente no forman óxidos en preferencia al Al₂O₃, sin embargo pueden ejercer un efecto perjudicial sobre la rapidez de oxidación del aluminio a altas temperaturas y durante largos tiempos de exposición. La rapidez de oxidación aumenta al favorecer las condiciones para que se lleve la reacción: la temperatura de trabajo, aumentar la presencia de elementos reactivos como el Mg y la presión parcial de O₂ en la atmósfera del horno, etc.

Con el CO₂ por lo general la velocidad de oxidación disminuye. Este factor junto con la presión parcial de oxígeno, indican que el control del quemador y la eficiencia del horno son importantes para la rapidez de oxidación total.

Ya que las aleaciones son disoluciones, la matriz actúa como disolvente al que se añaden los aleantes (solute). Generalmente la adición de aleantes reduce el punto de fusión de cualquier disolvente puro (aluminio), la mínima temperatura de fusión se alcanza a la composición eutéctica.

Las aleaciones comerciales de aluminio, principalmente son hipoeutécticas. Su temperatura de fusión varía en función de la concentración del soluto de acuerdo a la línea de *liquidus*. Para aleaciones hipoeutécticas ésta línea se puede describir aproximadamente a través de la siguiente ecuación:

$$T_l(C_i) = T_f - \frac{dT}{dC_i} C_i$$

Donde T_f es la temperatura de fusión del aluminio puro, 660 °C, $T_l(C_i)$ es la temperatura de *liquidus*, que es función de la concentración del elemento aleante y C_i es la concentración porcentual del elemento aleante.

Así las piezas de aluminio (principalmente las piezas provenientes de fundición) cuya composición química se encuentre más cerca de la composición eutéctica fundirán a menor temperatura que las piezas con menor contenido de aleantes (provenientes de conformado mecánico).

1.6. Formación de escorias de aluminio

El aluminio tiene una gran afinidad por el oxígeno, en consecuencia lo más común es encontrarlo combinado con éste elemento. Antes de obtener aluminio metálico a través del proceso de reducción electrolítica Hall-Heroult, el aluminio se encuentra en la forma de un óxido muy puro. Este óxido se obtiene del proceso de refinación Bayer, en el que se procesa el óxido de aluminio hidratado llamado bauxita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Para transformar éste óxido refinado, a metal, se requiere una alta cantidad de energía eléctrica (aproximadamente 58 GJ/Ton).

Las escorias metálicas son una mezcla heterogénea de metal libre con óxidos, nitruros, carburos, boruros, partículas refractarias, metales no disueltos, fundentes, etc. Esta se forma en el proceso de fundición, lo que incluye la fusión de materia prima, transferencia de metal, procesos de aleación, tratamiento con fundentes, agitación, desgasificación, escoriado y colada.

Las escorias se pueden clasificar por medio de su contenido metálico. Las que presentan alto contenido (denominadas escorias “blancas” o “húmedas”) generalmente se presentan como un material compacto de gran masa. Un bajo contenido se produce normalmente cuando la chatarra se trata con fundentes escorificantes. Esta escoria (denominada “negra o seca”) por lo general es granular con un alto contenido metálico en las fracciones gruesas y sobre todo óxidos y sales en las fracciones finas.

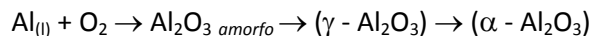
Al introducir la chatarra al horno, la cáscara de óxido preexistente en ésta (que es muy fina, $< 0.1 \mu\text{m}$) se engrosa durante el calentamiento directo (Figura 1.9). Una vez que se alcanza el punto de fusión comienzan a exudar gotas de la superficie de la chatarra. Estas se oxidan y corren sobre la chatarra sólida, solidificando nuevamente. Esto puede ocurrir varias veces hasta obtener el baño metálico. El resultado es una masa de cáscaras de óxido dentro de la capa de escoria, la mayoría de las cuales contienen gotas de aluminio atrapado por las fuerzas de tensión superficial.

Cuando se expone una superficie de aluminio líquido, la primer película de óxido que se forma sobre ésta, es la responsable de proteger en la forma de Al_2O_3 amorfa. Esta película continúa creciendo, antes de transformarse en otras formas cristalinas de óxidos. Como las películas de óxido más gruesas y viejas tienden a fracturarse debido a las tensiones, ya sea que se generen internamente (a través de los cambios de volumen, asociados a las transformaciones de fase) o de manera externa (a través de turbulencias en el líquido). El comportamiento real de una película de óxido sobre aluminio líquido depende de muchas variables incluyendo la composición química de la aleación, la temperatura de trabajo, la atmosfera en la bóveda del horno y el movimiento en el baño metálico.

Con el tiempo la fase amorfa sufre una transformación a alúmina cristalina, que se denomina $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. La γ -alúmina nuclea como cristal en las delgadas películas amorfas y sus cristales crecen lateralmente hasta que la totalidad de la película esta transformada; éste óxido tiene una estructura cúbica.

La fase amorfa y la primera fase de alúmina cristalina actúan como película protectora del metal líquido. Estas fases protectoras parecen estabilizarse por la presencia de iones hidroxilo OH^- provenientes del vapor de agua, que a su vez se origina como producto en las reacciones de combustión que ocurren en los quemadores del horno; así como de otros elementos como el berilio que proviene de los procesos de extracción y refinación. La estabilización de estas fases es

importante ya que retrasa el inicio de otra importante transformación, el cambio de $\gamma - Al_2O_3$ a $\alpha - Al_2O_3$ (corindón), éste posee una estructura hexagonal compacta, en cada celda unitaria están asociados 12 iones de aluminio y 18 de oxígeno.



El cambio volumétrico asociado con la transformación de fase $\gamma \rightarrow \alpha$ causa grietas de tensión que se forman dentro de la película, lo que ocasiona la pérdida de la capacidad protectora del óxido y aumenta la rapidez de oxidación. Los cristales de $\alpha - Al_2O_3$ inicialmente crecen dentro de la capa de $\gamma - Al_2O_3$, pero debido a las grietas formadas, el oxígeno se transporta fácilmente a través de ésta y comienza el crecimiento de los nuevos cristales de $\alpha - Al_2O_3$ cerca de la interface óxido/líquido. El crecimiento se acelera con la absorción de aluminio líquido a través de las grietas y la oxidación en la superficie, con lo que se incrementa el crecimiento del óxido, en el proceso conocido como "oxidación por ruptura". Esta transformación de $\gamma \rightarrow \alpha$ depende de varios factores, como la temperatura de trabajo, y el tiempo de permanencia en el horno.

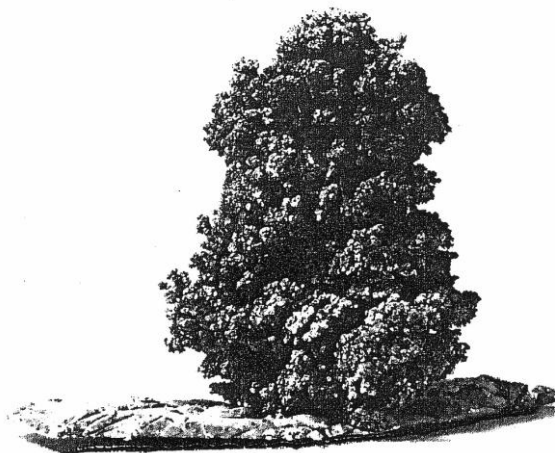
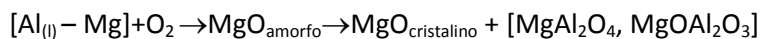


Figura1.9 Crecimiento del óxido sobre una muestra de aluminio expuesta a flama directa. (De Taylor^[1])

Las fases iniciales que se forman en las aleaciones Al-Mg son MgO amorfo y $MgAl_2O_4$, en lugar de Al_2O_3 amorfa. El MgO amorfo se encuentra presente después de un corto tiempo en todas las aleaciones con un contenido de Mg mayor al 1% y a menudo incluso a niveles más bajos. La película de MgO amorfo no es protectora. Esto significa que estas aleaciones son más propensas a la oxidación que el aluminio puro.

En las aleaciones Al-Mg la oxidación de ruptura no está asociada con la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$, si no con la formación de MgO cristalino y/o la espinela ($MgOAl_2O_3$ ó $MgAl_2O_4$) dentro de la capa de óxido. La espinela* parece ser que se forma preferencialmente en regiones localizadas que se agotan en Mg. La rapidez de oxidación durante la etapa de oxidación de "ruptura" es muy alta para las aleaciones Al-Mg en comparación al aluminio puro. Si se incrementa el contenido de Mg, disminuye el tiempo de incubación para que la ruptura ocurra y también aumenta la rapidez de oxidación.

*Las espinelas son óxidos de la forma AB_2O_4 donde A es un catión divalente y B es un catión trivalente.



La oxidación de ruptura en las aleaciones Al-Mg resulta en un crecimiento masivo de óxidos por encima de la superficie fundida. Este crecimiento es favorecido por la absorción de metal fundido a través de las grietas dentro de la película de óxido y también dentro de los canales internos que se desarrollan durante el crecimiento de los óxidos dando lugar a una oxidación adicional.

Movimientos turbulentos del metal líquido generan tensiones superficiales que remueven o fracturan las películas de oxido protectoras en la superficie del metal. Esta acción expone al metal líquido directamente bajo la ruptura a una oxidación inmediata. Cuanto mas metal se somete a este tipo de interrupciones, mayor será la velocidad de oxidación total.

La rapidez de oxidación de aluminio durante el calentamiento y la fusión total (mezcla de fases solidas y líquidas a una temperatura entre *liquidus* y *solidus*) puede ser mayor que el de una aleación completamente fundida en el rango de temperatura mas bajo de fusión. Cuanto más se tarde en calentar una carga en este rango de temperaturas, ocurrirá una mayor oxidación.

Cuando el aluminio se oxida, libera una gran cantidad de calor ($399 \text{ Kcal mol}^{-1}$). La escoria asentada en la superficie del metal líquido atrapa gotas de metal. Al ocurrir la reacción de oxidación, el calor de reacción queda atrapado en la película de escoria, elevando excesivamente su temperatura.

Si no se libera el calor generado por la reacciones de oxidación, es decir: $Q_{\text{generado}} > Q_{\text{perdido}}$, ocurren reacciones termitas en la escoria y algunas regiones de ésta pueden alcanzar los $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. En una película de escoria con cierto contenido metálico, basta que solo un porcentaje mínimo de aluminio retenido se oxide, para que la película alcance ésta temperatura. A ésta temperatura, el aluminio también reacciona, aunque en menor medida, con el nitrógeno del aire de acuerdo a la siguiente reacción, que genera $131 \text{ Kcal mol}^{-1}$: $2Al + N_2 \rightarrow 2AlN$

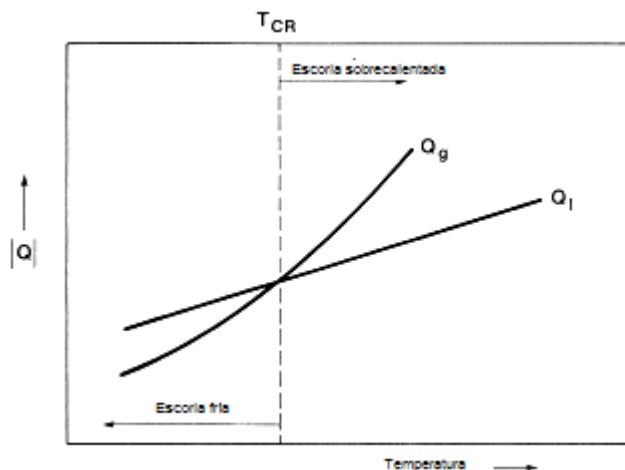


Figura. 1.10. Temperatura crítica de escoriado (De Taylor^[1]).

Se define la temperatura crítica de escoriado (Figura 1.10), como la temperatura a la cual el calor generado por la oxidación se iguala al calor que pierde el producto de la oxidación. Cuando la temperatura de la escoria se sitúa por debajo de ésta; la película cumple su función de protección.

En cambio cuando está por encima de la misma, la escoria se sobrecalienta y es necesario retirarla para evitar la oxidación continua de metal.

La oxidación depende del área expuesta; por lo que la relación área superficial/masa (A/m) de metal sólido cargado es importante. La fusión de chatarra de aluminio de espesor delgado, en comparación con chatarra de espesor grueso, generalmente sufre una oxidación mayor. También se ha encontrado que la condición de la superficie del metal sólido que se funde, afecta la cantidad y velocidad de oxidación (Figuras 1.11 y 1.12).

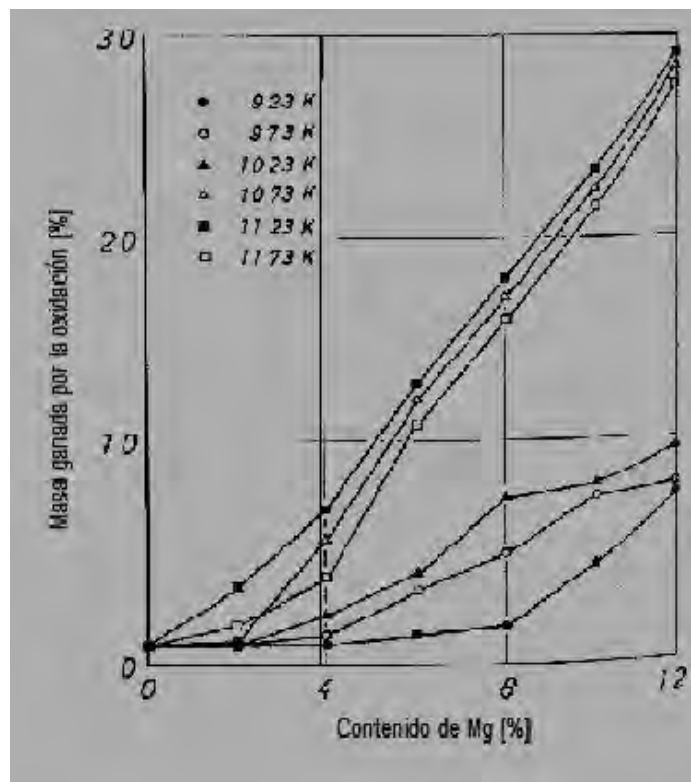


Figura 1.11 Efecto del contenido de Mg y la temperatura de trabajo sobre el peso ganado a través de la oxidación (De Taylor^[1]).

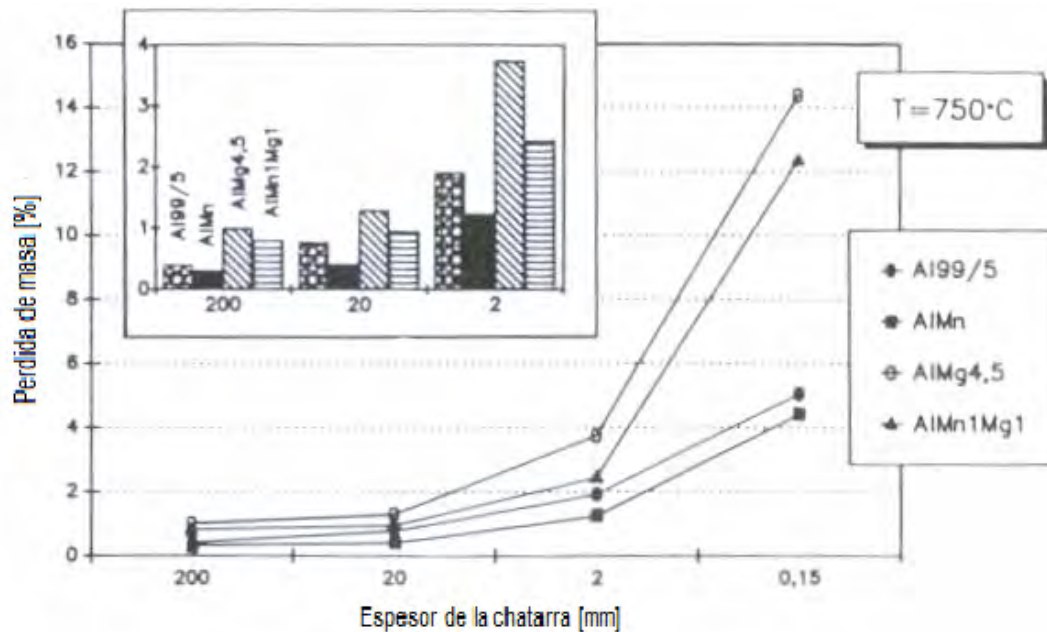


Figura 1.12. Efecto del espesor de la chatarra y el tipo de aleación en la pérdida del metal (De Taylor^[1]).

La chatarra con espesores delgados forma pequeñas gotas que son difíciles de liberar de las capas de óxido porque su masa no es suficiente para superar las fuerzas de tensión superficial de los óxidos. En cambio, chatarra con espesores mayores, contiene mayor masa, por lo que supera la tensión superficial de la capa de óxido y se incorpora libremente en el baño metálico.

En consecuencia la escoria puede contener cantidades muy diferentes de metal atrapado. La escoria húmeda puede contener desde un 15 hasta un 90% de metal, la escoria seca puede contener hasta 15%. Utilizando sales fundentes se puede facilitar la liberación del metal atrapado en la capa de óxido.

Los fundentes escorificantes están diseñados para promover la separación de la película de escoria del metal líquido. Estos se adicionan ya sea por peso, aproximadamente de 0.2 a 1 % de metal cargado o por superficie del metal líquido de 2.5 Kg/m² que corresponde a un espesor aproximado de 1 mm.

La fusión de chatarra puede llegar a producir niveles muy altos de escoria y pérdidas de metal. Esto se debe a varios factores:

- Tipos de chatarra, chatarra con altas relaciones área superficial/masa.
- Condiciones de la chatarra. Las reacciones de combustión de los contaminantes que contiene la chatarra producen excesos de calor que aceleran su oxidación.
- Exposiciones directas del material a las flamas. En los hornos de reverbero, en algunos casos, esto es inevitable.
- Eficiencia de calentamiento de la chatarra.
- Tiempo de permanencia del material en el horno.
- Temperatura de trabajo.
- Relación aire-gas en los quemadores, atmósferas oxidantes, presión de oxígeno.
- Sobrecalentamiento de la escoria.

1.7 Prevención, control y tratamiento de escorias de aluminio.

El objetivo de cualquier operación de fundición es minimizar la cantidad de escoria formada en el horno maximizar la cantidad de aluminio recuperado. La generación de escoria se puede controlar en el horno de reverbero por varias técnicas relacionadas con el acondicionamiento de la chatarra y practicas de fundición. La escoria que se genera puede tratarse para recuperar la mayor cantidad posible de aluminio.

1.7.1 Preparación de la chatarra.

La limpieza y acondicionamiento de la carga son los primeros pasos para mantener al mínimo la cantidad de escoria producida. La chatarra que se introduce al horno debe estar seca; la chatarra húmeda favorece la oxidación del metal y puede ser peligroso introducirla al horno a alta temperatura.

La chatarra sucia debido a los recubrimientos y pinturas que contiene contribuyen a la generación de escoria. Los gases y el calor producido por las reacciones químicas entre los recubrimientos y pinturas incrementan la cantidad de óxidos. Los recubrimientos agregan peso al material y disminuyen el valor del rendimiento. Los procesos para desmenuzar la chatarra y delacado reducen significativamente la cantidad de óxidos y de suciedad generada en el baño. La eliminación térmica de los recubrimientos (delacado) ayuda en la eliminación del material que debe ser removido del horno. El porcentaje típico de escoria generada a partir de material con recubrimientos es del 10-15%. En el material desmenuzado y limpio está entre el 3 y 6% de la carga. La chatarra debe ser almacenada en un lugar cerrado, libre de humedad y en condiciones que la mantengan limpia.

1.7.2 Introducción de chatarra al horno.

El contacto directo de la flama con la carga mientras se funde incrementa la generación de escoria. La producción de escoria en un horno se acelera cuando la temperatura de la superficie excede los 800 °C. Este fenómeno es la causa más importante de la generación de escoria dentro del horno. Para controlar este problema se puede agitar el baño para reducir la diferencia de temperatura entre la superficie y el baño. Cargar los materiales ligeros e incorporarlos al baño metálico por inmersión con el sistema de combustión en piloto disminuye la generación de escoria.

1.7.3 Practicas de fundición.

La capa de escoria que cubre el baño tiende a mantener el calor durante un largo periodo de tiempo, más que el metal. Generalmente se encuentra entre 37 y 65 °C más caliente que el metal. Esto a menudo se sitúa por encima del punto crítico de 800°C. Debido a esto el contenido metálico en la escoria se oxida así como el metal con el que tiene contacto directo. La flama y el oxígeno proveniente del exterior crea una gran fuente de ignición en la superficie de la escoria. Se debe liberar el calor atrapado en la capa de escoria, para evitar un aumento excesivo de temperatura.

Monitorear la temperatura de la chimenea es un buen indicador de cuando se necesita escoriar. Cuando la temperatura en la chimenea aumenta, la energía no es eficiente en el baño y se debe remover la escoria dentro del horno. El horno debe ser escoriado con el sistema de combustión apagado. No se deben colocar fundentes exotérmicos encima del baño o de la escoria. El uso de fundentes endotérmicos o enfriadores puede ser una manera efectiva de detener las reacciones que originan el sobrecalentamiento de la escoria.

1.7.4 Procesos de recuperación de aluminio a partir de escoria.

La escoria es considerada como un costo inevitable, en lugar de una oportunidad para aumentar las ganancias. Últimamente, esta situación ha cambiado significativamente y se han diseñado procesos de recuperación del contenido metálico que queda en ella.

La escoria se procesa con fundentes a una temperatura aproximada a los 800°C, para asegurar que el aluminio líquido tenga la fluidez que le permita transferirse al baño metálico. Existen varios tipos de fundentes, fundentes de cobertura, para refinar elementos en el baño metálico, para limpiar las paredes de los hornos. Generalmente en el tratamiento de escorias se utilizan fundentes escorificantes que consisten en una mezcla eutéctica de sales cuya composición es de 44wt% NaCl – 56wt% KCl que corresponde a una temperatura eutéctica de aproximadamente 650°C. Sin embargo debido al alto costo del KCl, lo más común es utilizar mezclas con 70 wt% NaCl – 30 wt% KCl y de 5 a 20 wt% de criolita. La adición de criolita Na_3AlF_6 incrementa la tensión interfacial entre la sal y el metal fundido; lo que mejora la extracción de metal de la película de óxido y favorece la aglomeración de las gotas metálicas.

La eficiencia de recuperación de aluminio utilizando fundentes se muestra en la figura 1.13.

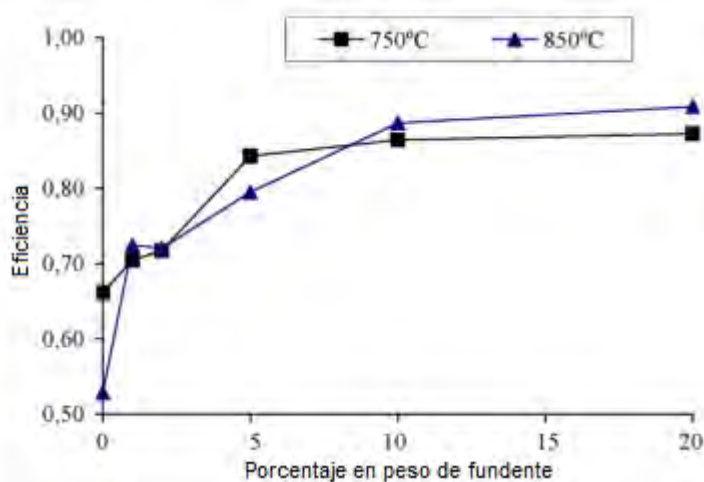


Figura 1.13 Eficiencia de recuperación en función de la proporción de fundente (De Verran, Kurzawa^[9]).

El contenido metálico se expresa como la relación porcentual de la masa de metal que se recupera entre la masa de escoria que se procesa.

2.1 Procedimiento experimental

La tesis consistió en diferentes etapas experimentales, mostradas en la figura 2.1.

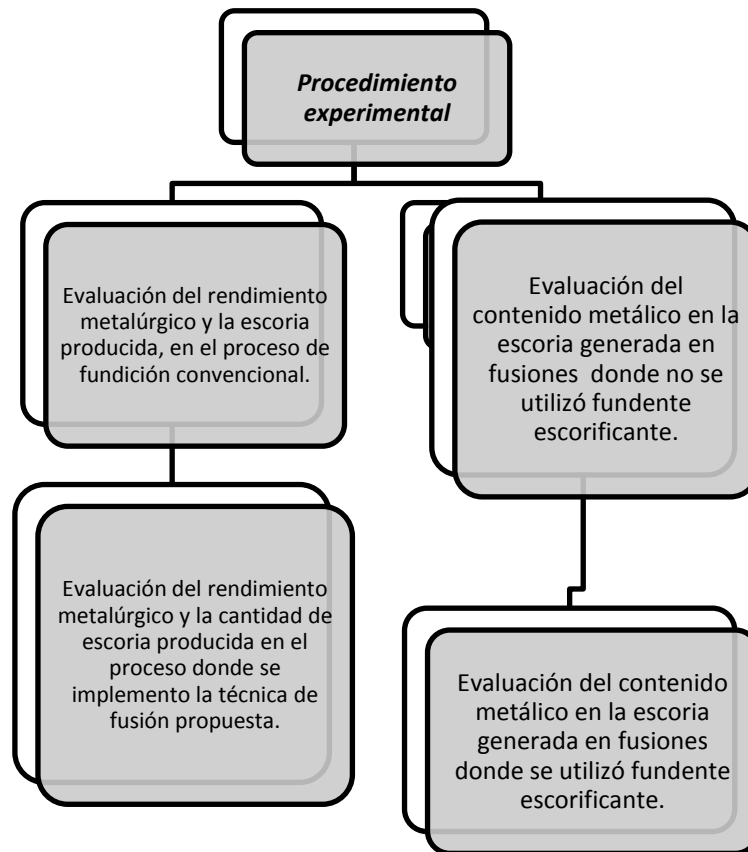






Figura 2.1. Diagrama del procedimiento experimental llevado a cabo para realizar ésta tesis.

En este trabajo se desarrollo un proceso experimental que consistió en lo siguiente:

1. Trabajo en planta para evaluar el rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria en el proceso fundición convencional.
2. Trabajo en planta para evaluar el rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria en el proceso donde se implemento la técnica de fusión propuesta.
3. Trabajo en laboratorio para evaluar el contenido metálico de la escoria generada en fusiones donde no se utilizó fundente escorificante.
4. Trabajo en laboratorio para evaluar el contenido metálico en la escoria producida en las fusiones donde se utilizó fundente escorificante.

El equipo utilizado en las pruebas experimentales realizadas en planta se describen en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Equipo utilizado en planta

	<p>Horno de reverbero basculante</p> <ul style="list-style-type: none">• Capacidad de 7 T.• Dos quemadores dispuestos longitudinalmente.• 1.36 m de diámetro x 4.8 m de largo.
	<p>Montacargas</p>
	<p>Contenedor</p> <ul style="list-style-type: none">• Volumen de 1.57 m³
	<p>Espadilla</p> <ul style="list-style-type: none">• 2.75 m de largo.

2.2 Evaluación del rendimiento metalúrgico y la escoria producida para la producción de aleaciones a partir de chatarra, en el proceso de fundición convencional.

La medición de estos factores se llevo a cabo en la planta. Para estas pruebas experimentales se utilizaron los siguientes equipos:

- Horno de reverbero basculante con dos quemadores dispuestos longitudinalmente.
- Contenedores.
- Espadilla.
- Montacargas.

Procedimiento experimental:

Se determino la cantidad y el tipo de materia prima a cargar al horno, en función al inventario de almacén de materia prima. Entre 6000 y 7000 Kg de chatarra. La materia prima se sometió previamente a un proceso de clasificación donde se separaron materiales ajenos, como acero, hierro, bronce, zinc, etc. Se precalentó el horno durante un lapso de una hora. Para esto la apertura de los quemadores se mantuvo al 100%.

Se cargo el material "macizo" y/o lingote. Los materiales se distribuyeron a lo largo del horno. La apertura de los quemadores se mantuvo al 100%. Si no se disponía de "macizo" o lingote en el inventario, se cargo material "blando".

Una vez que se introdujo todo el "macizo" y/o lingote se tapo el horno manteniendo la apertura de los quemadores al 100%. Cuando el material adquirió una consistencia pastosa, se comenzó a cargar el "blando" distribuyéndolo a lo largo del horno con la espadilla. En éste paso la apertura de los quemadores se redujo al 80%. Terminando de cargar toda la materia prima se tapo el horno y la apertura de los quemadores se aumento al 100%.

Cuando se volvió líquido el material, se retiro la escoria con la espadilla y se deposito en un contenedor. Se tomo una muestra de metal para análisis químico y una muestra representativa de escoria. Se tapo el horno para aumentar la temperatura y proceder a alear.

Después de ajustar la composición química con aleantes, el metal líquido se vació a las lingoteras y una vez solidificados se pesaron todos los lingotes (Producto conforme y no conforme), la escoria y los materiales residuales.

2.3 Evaluación del contenido metálico en la escoria generada en fusiones donde no se utilizo fundente escorificante.

Esta medición se llevo a cabo en el laboratorio. Para estas pruebas experimentales se utilizo:

- Horno de crisol eléctrico
- Crisol de SiC con capacidad de 2 Kg.
- Lingoteras.
- Pintura refractaria de grafito y zircón
- Herramental para escoriar y colar.

Procedimiento experimental:

Se llevo a cabo el muestreo de la escoria por el método del “cuarteo” y se tomaron cinco muestras representativas, las cuales se identificaron y se prepararon cargas de 1.5 Kg.

Se precalentó el crisol en el horno antes de cargar el material. Cuando se alcanzo una temperatura aproximada de 700 °C se introdujola carga. Se tapo el horno y se dejo por 20 minutos para permitir que se calentara el material. Posteriormente se agito constantemente para homogenizar la temperatura de la carga.

Cuando el aluminio se comenzó a depositar en el fondo del crisol se procedió a escoriar, cuidando de retirar escoria sin contenido metálico. Una vez que se retiro toda la escoria se vació el metal a las lingoteras. Se pesaron los lingotes y la escoria.

2.4 Técnica de fusión

1. Preparar la carga total de chatarra (aproximadamente 6 T) en una proporción aproximada de 50 % de “macizo” (se puede agregar lingote) y 50 % de “blando”.
2. Cargar todo el “macizo” al horno con los quemadores encendidos, con una apertura de 100%.

** Si en la fusión no se planea utilizar “macizo” o lingote, entonces se procede a utilizar “blando”, se forma el baño metálico con el 50% del total de la carga, para esto, cargar el material con los quemadores con 50 % de apertura; una vez que todo el material esta dentro del horno aumentar la apertura a 100%.*

3. Una vez que se ha cargado el material con el que se formara el baño metálico tapar el horno y esperar a que el material se vuelva líquido.
4. Medir la temperatura del baño metálico. Esperar a que se encuentre mínimo a 700 °C.
5. Disminuir la apertura de los quemadores.
6. Cargar el material “blando” en dosis de 700 Kg en contenedores (aproximadamente 2 contenedores con material “blando”). Al agregar la carga de cada contenedor, desplazar el material, de la boca del horno para descargar los contenedores restantes. (Esta operación debe llevarse a cabo lo más rápido posible por lo que se deben tener las cargas de material “blando” en espera en los contenedores.)
7. Agitar hasta incorporar el material “blando” al baño metálico.

8. Aumentar la apertura de los quemadores y tapar el horno, repetir desde el paso 4 hasta terminar de cargar todo el material "blando".
9. Ya que toda la materia prima se encuentra líquida verificar que el baño metálico se encuentre a una temperatura aproximada de 700 °C y apagar quemadores.
10. Mantener en movimiento la escoria, trasladando la escoria que se encuentra en la boca del horno hacía el fondo y trasladando la escoria del fondo hacía la boca del horno.
11. Cuando la escoria adquiera un aspecto de polvo fino negro retirarla del horno.

*Si se forman "turrone" (escoria sobrecalentada) retirarla inmediatamente. Si estos se forman antes del tratamiento con fundente, se deben retirar antes de comenzar con este proceso.

*Cuando el material "blando" constituya la mayor proporción de materia prima en la carga no se debe agregar fundente, éste se debe agregar solo cuando la mayor parte de la materia prima consista en material "macizo" o lingote.

2.5 Evaluación del rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de producción de aleaciones a partir de chatarra implementando la técnica de fusión propuesta.

Estos experimentos se llevaron a cabo en la planta industrial. Para estas pruebas experimentales se utilizo:

- Horno de reverbero giratorio con dos quemadores dispuestos longitudinalmente.
- Contenedores.
- Espadilla.
- Montacargas.

Procedimiento experimental:

Se prepararon cargas de entre 6000 y 7000 Kg de chatarra en una proporción de 50% de material "macizo" y 50% de material "blando". La chatarra se sometió previamente a un proceso de clasificación de materiales como en el procedimiento 2.1.

Primero se cargaron los materiales macizos y el lingote, una vez que se introducían estos materiales se tapaba el horno. En esta etapa se trabajó con una apertura de quemadores de 100%. Cuando la chatarra se adquirió un aspecto pastoso (aproximadamente a las dos horas de haber tapado el horno) se homogenizo la temperatura del material agitando con la espadilla. Se volvió a tapar hasta que se formo el baño metálico, se midió la temperatura del baño metálico y la apertura de los quemadores se mantuvo en 100%.

Cuando se formo el baño con el material "macizo" se apagaron los quemadores e ingresaron las primeras tolvas con material "blando". Se aprovecho el calor de combustión producido al ingresar el "blando" para ingresar más tolvas. Se midió la temperatura del baño metálico.

Se encendieron los quemadores, 60% de apertura el quemador 1 y a 10% de apertura el quemador 2 y se termino de cargar el "blando" en estas condiciones. Cuando se volvió líquido el

material y se depositó la capa de escoria en la superficie, esta se mantuvo en movimiento de “atrás hacia adelante” por un lapso de una hora. Se agregó 4 Kg de fundente escorificante y se mantuvo en movimiento durante diez minutos.

Se escorió, se pesó la escoria y se tomó una muestra de metal para el análisis químico y una muestra representativa de escoria. Después de ajustar la composición química con aleantes se pesaron todos los lingotes (Producto conforme y no conforme).

2.6 Evaluación del contenido metálico en la escoria producida en el proceso de producción implementando la técnica de fusión propuesta.

Esta medición se llevó a cabo en el laboratorio. Para estas pruebas experimentales se utilizó:

- Horno de crisol eléctrico.
- Crisol de SiC con capacidad de 2 Kg.
- Lingoteras.
- Pintura refractaria de grafito y óxido de zirconio.
- Herramental para escoriar y colar.

Procedimiento experimental:

Se llevó a cabo el muestreo de la escoria por el método del “cuarteo” y se tomaron cinco muestras representativas, las cuales se identificaron y se prepararon cargas de 1.5 Kg.

Se precalentó el crisol en el horno antes de cargar el material. Cuando se alcanzó una temperatura aproximada de 700 °C se introdujo la carga. Se tapó el horno y se dejó por 20 minutos para permitir que se calentara el material. Posteriormente se agitó constantemente para homogenizar la temperatura de la carga.

Cuando la escoria adquirió un aspecto terroso de color negro se retiró y se colocó en un contenedor. El metal depositado en el fondo se vació a lingoteras. Se registró el peso de la escoria y de los lingotes.

3.1 Evaluación del rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de fundición convencional y en el proceso de fundición implementando la técnica de fusión sugerida.

A partir de los procedimientos experimentales descritos en la sección anterior, se realizó la medición y el registro de la cantidad de materia prima procesada, la cantidad de aleación obtenida como lingote, escoria y material ferroso. Se determino el rendimiento de la chatarra y el rendimiento metalúrgico.

En la tabla 3.1 se presentan los datos adquiridos de las fusiones realizadas antes de implementar la técnica de fusión propuesta. Estos datos corresponden a procesos de fusión típicos que se llevan a cabo en la planta.

Tabla 3.1. Relación de la cantidad y tipo de materia prima procesada, productos obtenidos y rendimientos en el proceso de fundición convencional.

Fusión	Macizo (Kg)	Blando (Kg)	Lingote (Kg)	Si (Kg)	Cu (Kg)	Carga total (Kg)	Contenido de aluminio en la chatarra (Kg)	Aleación obtenida (Kg)	Material Ferroso (Kg)	Escoria (Kg)	Rendimiento de chatarra (%)	Rendimiento metalúrgico (%)
1	6497	0	0	0	0	6497	5590	5443	907	340	83.77	97.37
2	3775	1539	1191	382	52	6939	6939	5709	0	898	82.3	82.27
3	3217	3606	0	316	50	7189	6137	5460	1052	1700	75.95	88.97
4	3319	2783	0	230	14	6346	5954	5432	392	917	85.6	91.23
5	3128	2584	333	203	45	6293	6018	5552	275	807	88.22	92.25
6	2826	3646	0	406	90	6968	5925	5271	1043	1043	75.64	88.96
7	2674	1416	2491	229	90	6900	6900	6107	0	1033	88.51	88.51
8	2744	3527	260	320	54	6905	6655	6061	250	1228	87.77	91.07
9	2618	3671	0	217	0	6506	5395	5024	1111	889	77.22	93.12
10	2268	4333	545	212	0	7358	7008	5282	350	890	71.78	75.37
11	1159	4040	1300	320	33	6852	6552	5009	300	948	73.1	76.45
12	819	4046	1354	392	45	6656	6656	3991	0	1527	59.96	59.96
13	474	4162	1528	365	70	6599	6432	5028	167	729	76.2	78.17
14	0	4122	2385	427	82	7016	6758	5036	258	748	71.78	74.52
15	0	4088	2187	486	54	6815	6567	5484	248	867	80.47	83.51

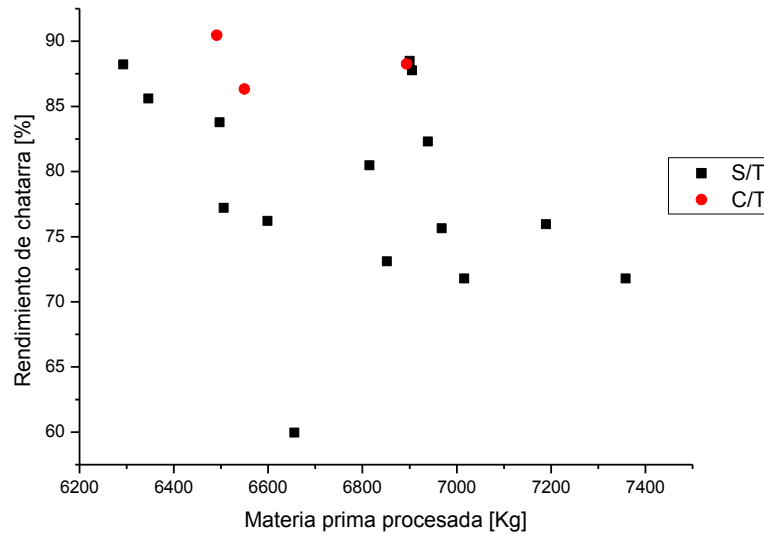
Se llevaron a cabo tres fusiones implementando la técnica de fusión propuesta, los parámetros medidos en esta etapa se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Relación de la cantidad y tipo de materia prima procesada, productos obtenidos y rendimientos en el proceso de fundición implementando la técnica de fusión propuesta.

Fusión	Macizo (Kg)	Blando (Kg)	Lingote (Kg)	Si (Kg)	Cu (Kg)	Carga total (Kg)	Contenido de aluminio en la chatarra (Kg)	Aleación obtenida (Kg)	Material Ferroso (Kg)	Escoria (Kg)	Rendimiento de chatarra (%)	Rendimiento metalúrgico (%)
1	3151	3020	320	0	0	6491	6161	5872	330	536	90.46	95.31
2	2217	3577	718	333	49	6894	6369	6084	525	666	88.25	95.52
3	1565	4521	0	380	84	6550	6288	5655	262	720	86.33	89.93

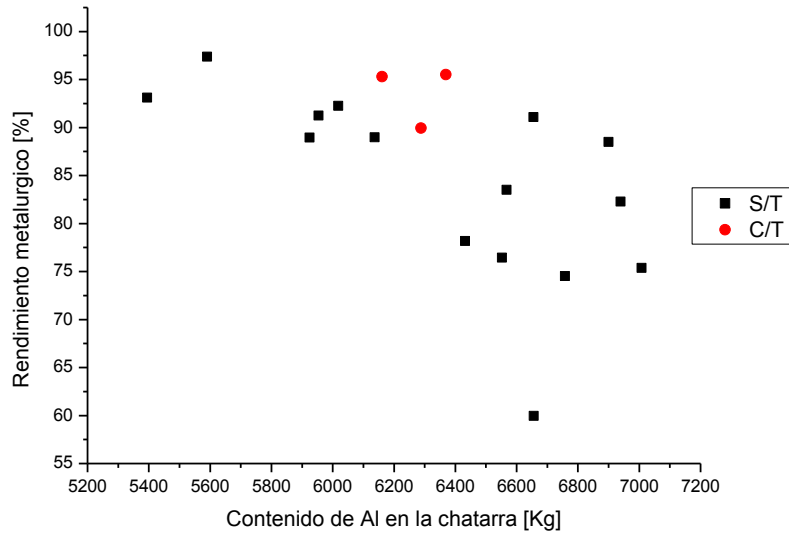
Los siguientes gráficos se construyeron con los datos reportados en las tablas 3.1 y 3.2. El rendimiento de la chatarra, mostrado en la gráfica 3.1, es la relación porcentual que involucra el metal recuperado como lingote con la cantidad total de chatarra procesada, junto con los aleantes.

$$\text{Rendimiento de la chatarra} = \left[\frac{\text{Metal recuperado}}{\text{Chatarra procesada} + \text{Aleantes}} \right] 100$$



Grafica 3.1. Rendimiento de la chatarra en función de la materia prima procesada considerando el contenido ferroso. Comparación entre el proceso convencional y el proceso propuesto. S/T: Proceso convencional, sin aplicar la técnica de fusión propuesta y C/T: Proceso implementando la técnica de fusión propuesta.

La grafica 3.2 muestra el rendimiento metalúrgico en función del contenido de aluminio en la chatarra. Se muestra el efecto de la técnica de fusión propuesta, sobre las fusiones convencionales.



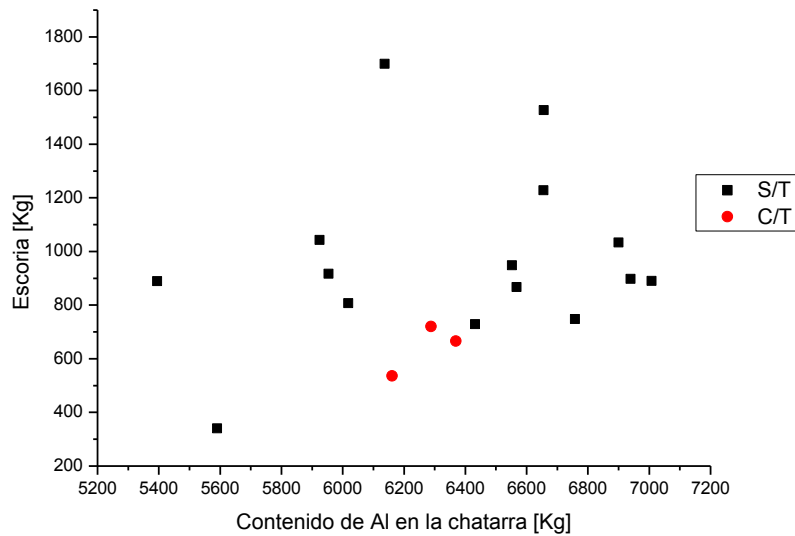
Grafica3.2 . Rendimiento metalúrgico en el proceso convencional (S/T) y en el proceso donde se implemento la técnica de fusión propuesta (C/T), en función del contenido de aluminio en la chatarra. El contenido de aluminio en la chatarra se define como: Materia prima procesada - Material ferroso.

En el rendimiento metalúrgico no se toma en cuenta la cantidad de material ferroso en la chatarra, si no que, solo se considera la cantidad de aluminio presente en ésta. Es decir, Contenido de Al en la chatarra = Materia prima procesada – Material ferroso. Éste parámetro mide la

recuperación de metal como lingote a partir del aluminio presente en la chatarra y se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Rendimiento metalúrgico} = \left[\frac{\text{Metal recuperado}}{\text{Contenido de Al en la chatarra} + \text{Aleantes}} \right] 100$$

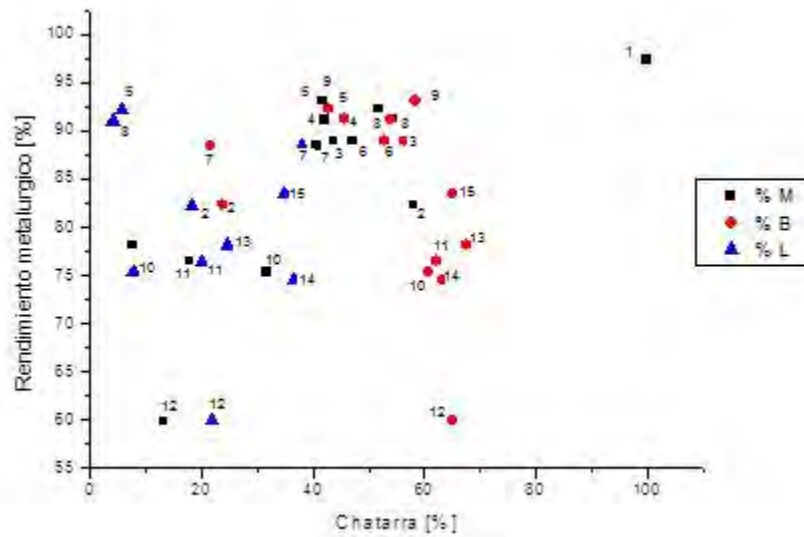
La gráfica 3.3 muestra la cantidad de escoria generada en función del contenido de aluminio en la chatarra. Se observa que al aplicar la técnica de fusión propuesta, disminuye la generación de escoria, en comparación al proceso convencional.



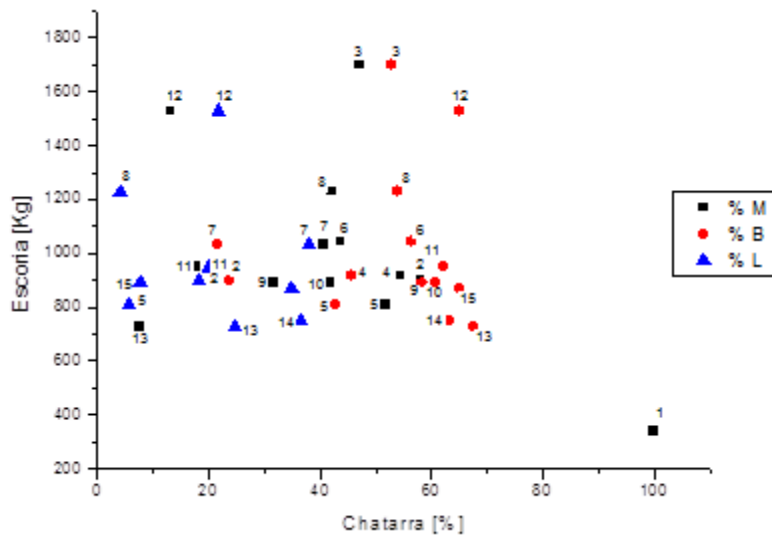
Gráfica 3.3. Cantidad de escoria generada en el proceso convencional (S/T) y en el proceso donde se implemento la técnica de fusión propuesta (C/T), en función del contenido de aluminio en la chatarra. El contenido de aluminio en la chatarra se define como: Materia prima procesada - Material ferroso.

3.2 Efecto del tipo y proporción de chatarra procesada sobre el rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de fundición convencional.

Las gráficas 3.4 y 3.5 muestran el rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en función del tipo y proporción de chatarra procesada en el proceso de fundición antes de implementar la técnica de fusión propuesta. Los números indican la fusión de acuerdo a la tabla 3.1.



Grafica 3.4. Rendimiento metalúrgico en función del tipo de chatarra procesada (%) en el proceso de fundición convencional. %M: "Macizo", %B: "Blando", %L: Lingote. El numero indica la fusión de acuerdo a la tabla 3.1.



Grafica 3.5. Cantidad de escoria producida en función del tipo de chatarra procesada (%) en el proceso de fundición convencional. %M: "Macizo", %B: "Blando", %L: Lingote. El numero indica la fusión de acuerdo a la tabla 3.1.

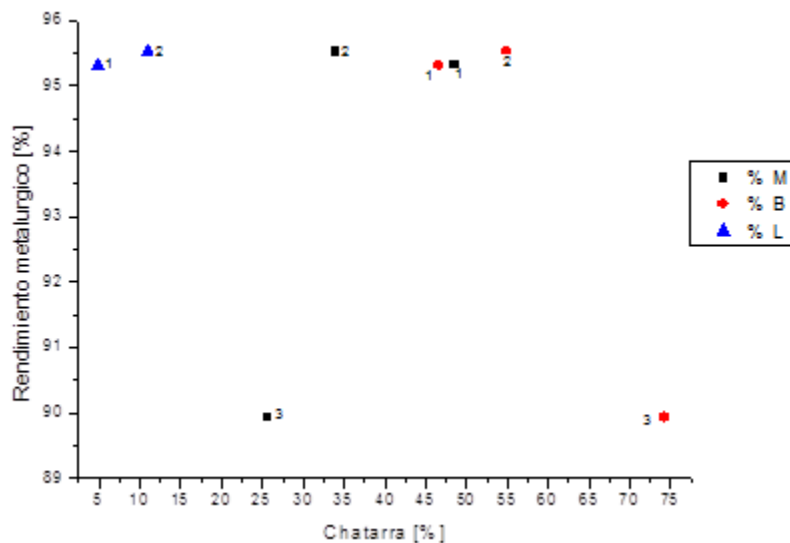
La figura 3.1 muestra la manera en que se introduce el material "blando" al horno, durante el proceso de fundición convencional. Se observa la combustión de material "blando" al entrar en contacto con la flama, incrementando la oxidación de los materiales.



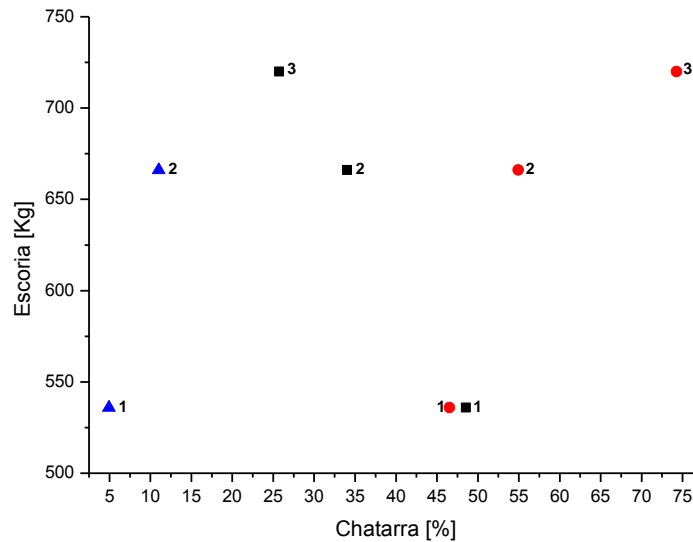
Figura 3.1. Carga y distribución del material “blando” en el horno.

3.3 Efecto del tipo y porcentaje de chatarra procesada sobre el rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de fundición empleando la técnica de fusión propuesta.

Las gráficas 3.6 y 3.7 muestran el efecto del tipo y proporción de chatarra procesada sobre el rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en el proceso de fundición aplicando la técnica de fusión propuesta. Los números indican la fusión de acuerdo a la tabla 3.2.



Gráfica 3.6 Rendimiento metalúrgico en función del tipo de chatarra procesada (%) implementando la técnica de fusión propuesta. %M: “Macizo”, %B: “Blando”, %L: Lingote. El numero indica la fusión de acuerdo a la tabla 3.2.



Grafica 3.7 Cantidad de escoria producida en función del tipo de chatarra procesada (%) implementando la técnica de fusión propuesta . %M: "Macizo", %B: "Blando", %L: Lingote. El numero indica la fusión de acuerdo a la tabla 3.2.

3.4 Tiempos y Movimientos aplicando la Técnica de Fusión.

La tabla 3.3 presenta los tiempos y movimientos que se dan al emplear la técnica de fusión. El tiempo total entre las etapas en las que se introduce la chatarra y se retira la escoria en el proceso de fundición convencional oscila entre 7 y 8 horas.

Tabla 3.3 Control de la apertura de los quemadores y tiempos de operación para la implementación de la técnica de fusión.

Actividad	Tiempo [h]	T Baño [°C]		% Apertura de quemadores	
		Antes de agregar	Después de agitar	Quemador 1	Quemador 2
Carga de "Macizo".	4.5	----	575	100	100
Carga de "Blando".	0.16	572	570	0	0
	1.1	570	570	10	30
	0.4	570	570	35	80
	0.3	570	570	70	80
	0.3	570	570	30	30
	0.2	570	570	0	0
Movimiento de escoria y escoriado.	1.1	570	570	0	0
Tiempo total [h]	8.06				

En promedio el tiempo total entre las etapas en las que se introduce la chatarra y se retira la escoria en el proceso de fundición empleando la técnica de fusión propuesta es de 8 horas. Se

controla la apertura de los quemadores al momento de cargar la chatarra. El quemador 1 se encuentra al fondo del horno y el quemador 2 se encuentra en la parte frontal.

3.5 Análisis de la escoria.

Las siguientes figuras muestran imágenes de la escoria obtenida.



Figura 3.2. "Turrón" de escoria sobrecalentada.



Figura 3.3. Escoria con alto grado de sobrecalentamiento.



Figura 3.4. Escoria granular "seca".

La imagen de la Figura 3.2 presenta un "turrón" de escoria sobrecalentada. Este tipo de escoria se forma debido al exceso de calor ocasionado por las reacciones de oxidación del aluminio y agentes contaminantes de la chatarra.

La Figura 3.3 muestra escoria con mayor grado de oxidación que la de la figura 3.2. En este proceso se trabajó con un gran porcentaje de material "blando" (Fusión 14 de la tabla 3.1), esta escoria no se retira inmediatamente del horno, sino hasta que se realiza el proceso de escoriado.

La escoria mostrada en la Figura 3.4 es escoria "seca", es decir con bajo contenido metálico. Esta presenta un aspecto granular y se obtuvo de un proceso de fusión donde el total de materia prima cargada al horno era material "macizo" (Fusión 1 de la tabla 3.1).

En la Figura 3.5 se expone una muestra de escoria con alto contenido de material ferroso. Su presencia genera altas pérdidas de metal, ya que el aluminio se adhiere a éste.

La escoria “húmeda”, con alto contenido metálico, se presenta en la Figura 3.6. Está escoria se genero de un proceso donde no se utilizo fundente.



Figura 3.5. Escoria con alto contenido ferroso.



Figura 3.6. Escoria “húmeda”.

La escoria sobrecalentada, “turrón”, dentro del horno, se forma debido a la gran cantidad de calor que se mantiene atrapado en la capa de escoria, el calor es generado por las reacciones con el oxígeno, nitrógeno y otros elementos (Figura 3.7), lo que incrementa la temperatura del sistema e incrementa la cantidad de escoria.



Figura 3.7. Escoria sobrecalentada dentro del horno .



Figura 3.8. Escoria sobrecalentada.

La escoria sobrecalentada (Figura 4.7 y 4.8) se mantiene a temperaturas muy altas (superiores a 1000°C). El metal en contacto con aire y expuesto a esta temperatura se continua oxidando, ocasionando perdidas de metal.



Figura 3.9. Escoriado manteniendo la apertura de los quemadores con alta intensidad.

3.6 Evaluación del contenido metálico en la escoria generada en fusiones donde no se utilizó fundente escorificante.

Se tomaron cinco muestras aleatorias de escoria producida en fusiones donde no se utilizó fundente escorificante. Las muestras se tomaron de fusiones donde el porcentaje de material "macizo" y lingote en la carga fue mayor al 50%.

En el laboratorio, se trataron muestras representativas de 1.5 Kg por el método del cuarteo como se muestra en la figura 3.10.

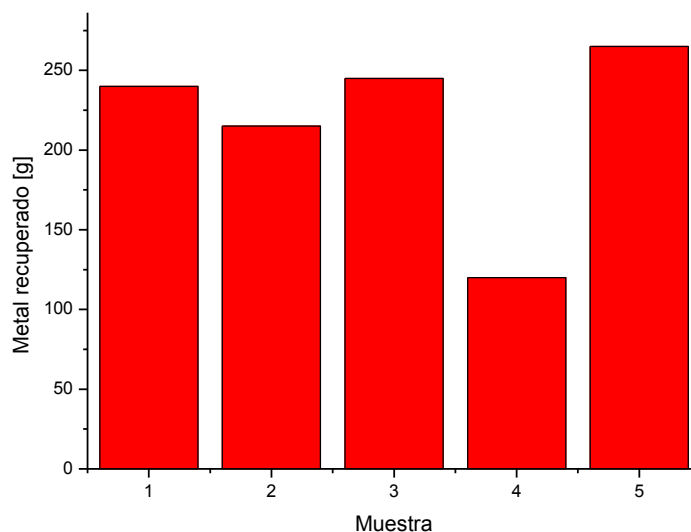


Figura 3.10 Adquisición de muestras representativas de escoria. Al frente están las muestras en obtenidas de fusiones sin fundente, atrás las muestras obtenidas de fusiones con fundente.

Se llevo a cabo la recuperación metálica de cada muestra. El porcentaje de contenido metálico se muestra en la tabla 3.4. La gráfica 3.8 muestra la tendencia que sigue el contenido metálico en la escoria.

Tabla 3.4 Contenido metálico en la escoria generada en fusiones sin utilizar fundente.

Muestra	Cantidad de escoria (g)	Metal recuperado (g)	% Metálico en la escoria
1	1500	240	16
2	1500	215	14.3
3	1500	245	16.3
4	1500	120	8.0
5	1500	265	17.6



Gráfica 3.8 Determinación del contenido metálico en la escoria producida en las fusiones donde no se utilizó fundente.

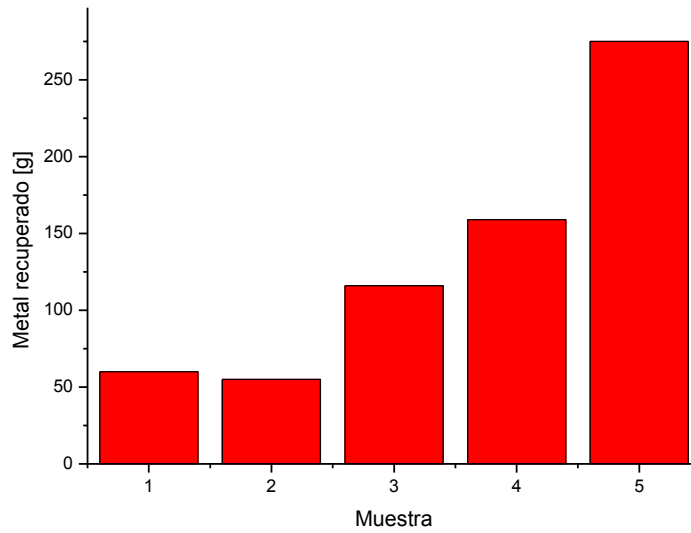
3.7 Evaluación del contenido metálico en la escoria generada en fusiones donde se utilizó fundente escorificante.

Se realizó la recuperación metálica a partir de escoria, para determinar el contenido metálico porcentual en la escoria obtenida de fusiones donde se utilizó fundente escorificante. Las muestras se tomaron de fusiones donde el porcentaje de material “macizo” y lingote en la carga fue mayor al 50%.

Los resultados se muestran en la tabla 4.5. La gráfica 3.10 presenta la tendencia del contenido metálico en las muestras de escoria.

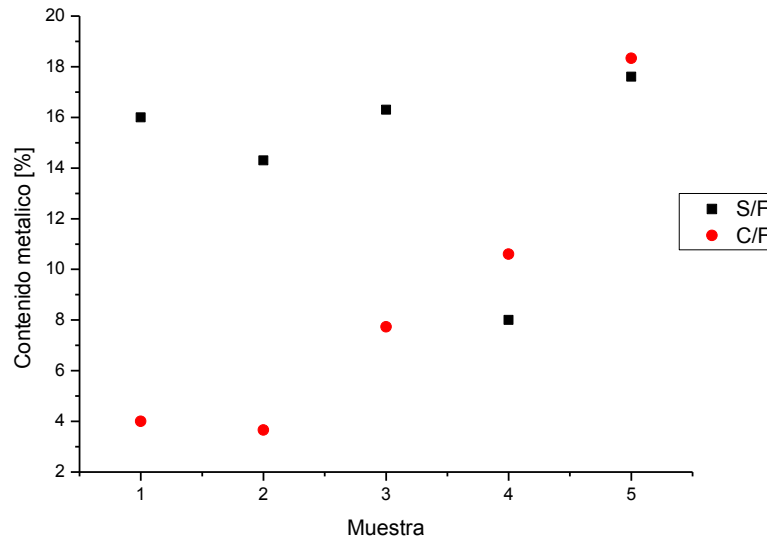
Tabla 3.5 Contenido metálico en la escoria generada en fusiones donde se utilizó fundente.

Muestra	Cantidad de escoria (g)	Metal recuperado (g)	% Metálico en la escoria
1	1500	60	4.00
2	1500	55	3.66
3	1500	116	7.73
4	1500	159	10.60
5	1500	275	18.33



Gráfica 3.9 Determinación del contenido metálico en la escoria producida en las fusiones donde se utilizó fundente.

En la gráfica 3.10 compara el efecto del fundente sobre el contenido metálico en la escoria. Al utilizar fundente, el contenido metálico en la escoria disminuye.



Gráfica 3.10 Comparación entre el contenido metálico porcentual en la escoria procedente de las fusiones donde no se empleo fundente (S/F) y la escoria obtenida de las fusiones donde se empleo fundente (C/F).

A continuación se presenta el análisis de los resultados mostrados en la sección anterior. Los aspectos químicos y físicos del proceso de fundición y del fenómeno de formación de escorias, son complejos, ya que se rigen por las leyes termodinámicas y cinéticas. Para comprender mejor estos procesos, a partir de éste enfoque, es útil el empleo de modelos matemáticos, ya que éstos definen y delimitan al sistema mediante parámetros de proceso, como pueden ser la temperatura, la composición química, los calores de reacción, entre otros. Estos puntos están fuera del propósito de éste trabajo, ya que para el interés del personal de la planta, solo basta definir parámetros que indiquen niveles de producción. Por lo tanto el análisis presentado tiene un enfoque cualitativo.

4. 1 Evaluación del rendimiento metalúrgico y la cantidad de escoria producida en los procesos de fundición convencional, y sugerido implementando la técnica de fusión.

La materia prima utilizada para estos experimentos consistió en varios tipos de chatarra de aluminio, citados en el desarrollo experimental. La chatarra se carga al horno precalentado, mezclada en distintas proporciones. Al ingresar la chatarra al horno, la apertura de los quemadores es alta, lo que genera una flama de gran intensidad. En general se carga primero el macizo y el lingote (en las fusiones donde se procesa éste material); cuando el macizo o lingote se vuelve pastoso se carga el blando. Se lleva esta secuencia porque el “macizo” y el lingote funden con mayor rapidez en comparación con el “blando”.

La chatarra no se somete a estrictos procesos de separación de componentes ajenos, como acero, hierro, bronce, entre otros. Tampoco se trata con procesos de limpieza como delacados o pirolisis, debido a que no se cuenta con la infraestructura para realizar estas operaciones.

Se procesa todo tipo de chatarra, por su bajo costo. El precio del “blando” es menor que el del macizo o el lingote. El lingote, generalmente proviene de procesos de recuperación de aluminio a partir de escoria, su precio es mayor al del macizo. En algunas ocasiones se trabaja con aleaciones 1100 que caen dentro de los materiales “blandos”, sin embargo su precio es elevado debido a que es aluminio relativamente puro, el precio del rin, que se considera “macizo”, también es elevado, pues para su manufactura, se utiliza aluminio primario; estos se utilizan para ajustar la composición química del metal cuando hay elementos que no son fáciles de controlar con la adición de fundentes, como el Fe, Cu y el Zn.

Para calcular el rendimiento porcentual de la chatarra se determino la relación porcentual entre el material obtenido como lingote (incluyendo el lingote indicado como “no conforme” por control de calidad) y la suma de la materia prima procesada para obtenerlos (chatarra, lingote, retornos y aleantes).

Las gráficas 3.1 y 3.2 indican que el rendimiento del proceso convencional se encuentra entre el 70% y 80%. La diferencia entre el rendimiento de la chatarra y el metalúrgico se debe a que en el primero se toma en cuenta toda la masa de la chatarra. Generalmente la chatarra contiene gran cantidad de material ferroso que no aporta masa, durante el proceso de transformación, a producto terminado; sin embargo se considera su peso en la materia prima. El rendimiento metalúrgico considera la masa efectiva que participa en el proceso de transformación, es decir la cantidad de aluminio en la chatarra.

El rendimiento metalúrgico para la fusión 1, reportada en la tabla 3.1, es del 97% y se generaron 340 Kg de escoria. El alto rendimiento obtenido se debe al tipo de materia prima con la que se trabajó, se procesaron 6497 Kg de material “macizo”, esto indica que el material “macizo”, en general, genera poca cantidad de escoria, en la fusión 7 (Tabla 3.1) se procesaron 2674 Kg de “macizo” y 2491 Kg de lingote con 1416 Kg de “blando”, se obtuvo un rendimiento metalúrgico de 88.5%. En general los rendimientos altos se obtuvieron con fusiones en las que el “macizo” y el lingote se encuentran en mayor proporción. El “macizo” y el lingote poseen una relación $\text{área superficial}/\text{masa} < 1$. Durante su estancia dentro del horno el “macizo” y el lingote reaccionan con el oxígeno presente en la bóveda del horno. Se forma una delgada capa de óxido sobre la superficie de la chatarra sólida. Esta capa impide que el material se continúe oxidando ya que dificulta la difusión del oxígeno a través de ella. El material continúa elevando su temperatura, por conducción térmica (Schlesinger^[2], *et al.*), hasta que se alcanza el punto de fusión y la masa protegida por la capa de óxido se transforma a líquido. Esta masa, que es una cantidad significativa en estos materiales, contribuye directamente a que la recuperación metálica sea elevada.

En la fusión 12 (Tabla 3.1) el rendimiento metalúrgico fue de 59.9%. Aquí se procesaron 4 toneladas de material “blando” y 1.3 toneladas de lingote. El lingote posee una alta eficiencia de recuperación, debido a que su relación $\text{área superficial}/\text{masa} < 1$ y al igual que en el “macizo”, se forma una película protectora de óxido durante el calentamiento, a comparación del “macizo”, el lingote tarda más en volverse líquido, debido a que posee espesores gruesos que retardan la transferencia de calor, sin embargo este material aporta gran cantidad de masa a la fundición.

El “blando”, que consiste en materiales delgados con poca masa, posee una relación $\text{área superficial}/\text{masa} > 1$.



En general el espesor de éstos materiales oscila entre 1 y 5mm. El conjunto de chatarra que reposa en el horno se puede considerar como un “sólido poroso” (Bourgeois, Chapdelaine^[3], *et al.*); el aire penetra entre los espacios que se forman en la carga (“poros”), atraviesa los “canales” formados por ésta, y el oxígeno reacciona sobre las superficies con las que entra en contacto. Debido a esto el metal que se recupera es muy poco, dependiendo del espesor del material. La gran afinidad del aluminio para reaccionar con el oxígeno, provoca que la oxidación ocurra inmediatamente. Gran cantidad de “blando” contiene recubrimientos (pinturas, grasa, baños electrolíticos, etc); entre ellos las pinturas y recubrimientos con solventes, provocan una combustión espontánea que oxida en mayor grado la superficie y generan productos de reacción con el aluminio, adicionales a los óxidos, que aumentan las pérdidas de metal.

Las descripciones expuestas anteriormente describen la oxidación sufrida durante el calentamiento de la chatarra sólida. Una vez que se logra fundir toda, continúa la oxidación sobre la superficie del metal líquido. Los óxidos y productos adicionales formados durante la etapa de calentamiento permanecen en la superficie del metal ahora ya líquido. Las nuevas superficies de metal líquido se oxidan inmediatamente, sin embargo ésta película de óxido al igual que en el metal sólido protege el resto de baño metálico.

Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran la escoria sobrecalentada. Esta no se retira, por lo que el metal con el que tiene contacto se continúa oxidando. Esta escoria se encuentra a 2000 °C aproximadamente (Taylor^[1], *et al.*). En la operación se agita la escoria para evitar que se sobrecaliente. Las Figuras 3.2 y 3.3 muestran el aspecto de la escoria sobrecalentada fuera del horno.

De acuerdo a la literatura (Taylor^[1], *et al.*), la escoria se calcina porque el calor de oxidación (lo que ocasiona la formación de alúmina y otros compuestos) se queda atrapado en ésta, como consecuencia el metal con el que se encuentra en contacto directo reacciona rápidamente. En la sección 1.6 se menciona que la capa de óxido que se forma en la escoria es protectora (Al_2O_3 amorfa, $\gamma - Al_2O_3$ cristalina), sin embargo como la temperatura de la escoria sobrecalentada llega a alcanzar los 2000 °C, la $\gamma - Al_2O_3$, que posee una estructura cristalina definida, sufre una transformación de fase a corindón ($\alpha - Al_2O_3$) de estructura cristalina hexagonal, éste óxido no es protector; a través de su red cristalina se difunde el oxígeno y aluminio (y otros elementos como el N) que reaccionan.

Otro factor que influye en la formación de escoria, es el escoriado (Figura 3.9), el retiro de escoria se lleva a cabo con la apertura de flama alta (Tabla 4.1). La capa de escoria protege el metal de la oxidación. Al retirarla, el contacto directo con la flama oxida inmediatamente las nuevas superficies de aluminio.

En la Figura 3.4 se observa la escoria “seca” con bajo contenido metálico. Aquí la escoria se mantuvo en movimiento. El calor no se concentró, evitando el sobrecalentamiento de la escoria. Esta es una mezcla de óxidos y otros compuestos, como el hollín.

La figura 3.5 muestra el contenido ferroso, principalmente de acero, al que se adhiere aluminio. El acero se retira de la chatarra por separación gravimétrica o magnética en los procesos de acondicionamiento. Mientras no se cuente con procesos de éste tipo, las pérdidas de aluminio por adherencia continuaran siendo elevadas, repercutiendo en la producción y los costos.

La escoria húmeda (Figura 3.6) se obtiene por diversos factores, entre ellos la habilidad del operador, en ocasiones debido a la magnitud industrial del proceso, es difícil controlar la velocidad de escoriado (en la planta esto se lleva a cabo con ayuda de un montacargas). Sin embargo otra causa de la escoria húmeda es el atrapamiento del metal por capilaridad y debido a las turbulencias generadas durante el movimiento.

Tabla 4.1. Apertura y potencia de los quemadores (De acuerdo a proveedor de equipo industrial de combustión CICSA).

Apertura (%)	Potencia (BTU/ft ² h)	Relación aire gas: 25/1
100	2500000	Alta eficiencia de calentamiento/ condiciones favorables para la oxidación.
80	2000000	
60	1500000	
50	1250000	
40	1000000	
20	500000	
15	375000	Baja eficiencia de calentamiento/condiciones bajas de oxidación.
8	200000	

La Tabla 4.1 presenta la apertura de los quemadores en función al poder calorífico que generan. La apertura se refiere a la abertura, en porcentaje, de la válvula que permite la salida de la flama. De acuerdo a la intensidad de flama, se emite una determinada cantidad de calor. Se utiliza gas licuado de petróleo como combustible. La relación óptima *aire/GLP* para los quemadores es:

$$\text{aire/GLP} = 25:1$$

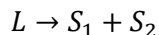
Esto genera una presencia alta de oxígeno en la atmosfera del horno, pero proporciona una flama que es más eficiente en la transferencia de calor, acelerando el calentamiento de la chatarra.

Los elementos aleantes pueden participar en la formación de óxidos que forman parte de la escoria. (Ver Apéndice 1).

La técnica de fusión presentada en la sección 2.4 tiene como objetivo disminuir la formación de escoria durante el proceso de fundición. Se basa, en el hecho de incorporar los materiales con relación *área superficial/masa* > 1, es decir, el material "blando", por inmersión en un baño metálico formado con chatarra con relaciones *área superficial/masa* < 1, es decir el material "macizo" y el lingote.

Durante este proceso se forma el baño metálico con el material "macizo" y el lingote. Como se menciona anteriormente, durante su calentamiento se forma una película de óxido que protege la masa restante de la oxidación continua. Al poseer cuantitativamente mayor masa en comparación con la superficie capaz de reaccionar, estos materiales otorgan una alta fracción de metal al baño. Por lo tanto, se considera que la tasa de oxidación de estos materiales es menor que la de materiales "blandos".

La elección de material "macizo" y lingote para formar el baño metálico se debe a que el punto de fusión de estos materiales es menor que el de la chatarra proveniente de materiales conformados mecánicamente. Los materiales "macizos" y los lingotes poseen mayor cantidad de aleantes que los "blandos". Generalmente los "macizos" son piezas de procedentes de fundición. El disolvente puro en una aleación, como cualquier otra disolución, disminuye su punto de fusión al introducir aleantes (soluto). La mínima temperatura de fusión es la temperatura eutéctica donde ocurre la siguiente reacción:



En las aleaciones Al-Si la temperatura eutéctica es de 577 °C, que corresponde a una composición de 11.7% de Si. De acuerdo al compendio de composición química de materia prima de la empresa, la chatarra de “macizo” contiene de 4 a 12% de Si. La temperatura de *liquidus*, que es la temperatura en función del porcentaje de elemento aleante, se determina con la siguiente expresión.

$$T_l(C_i) = T_f - \frac{dT}{dC_i} C_i$$

Donde T_f es la temperatura de fusión del aluminio puro, 660 °C, $T_l(C_i)$ es la temperatura de *liquidus*, que es función de la concentración del elemento aleante y C_i es la concentración porcentual del elemento aleante.

Aunque la composición química de la chatarra oscila alrededor de la composición eutéctica del sistema Al-Si, la línea de *liquidus* y su rango de solidificación también se ven afectados por la presencia de los elementos aleantes restantes (Cu, Fe, Mg, y Zn), estos modifican la línea de *liquidus* disminuyendo aún más la temperatura de fusión del material.


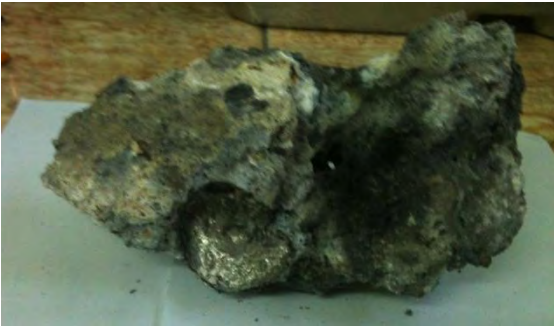

La tabla 3.3 muestra que la temperatura del baño permanece casi constante a 570 °C, esta es menor que la temperatura eutéctica de las aleaciones Al-Si (577 °C). Aunado al efecto de los aleantes sobre la temperatura de fusión de una aleación, se debe tener en cuenta que la temperatura se midió con un termopar en la zona de alimentación del horno. Esta es una zona fría ya que no tiene contacto directo con las flamas de los quemadores y se encuentra expuesta a la temperatura ambiente cuando el horno se encuentra abierto. A lo largo del horno, el baño líquido presenta gradientes de temperatura, siendo la zona del fondo del horno la que mantiene la temperatura más alta, la cual decrece al acercarse a la zona de alimentación. Si se considera al baño metálico como un líquido estático, además de la radiación procedente de los quemadores y las paredes del horno, la conducción de calor a través del baño metálico juega un papel muy importante, así se puede determinar el gradiente de temperaturas con base a los modelos que describen estos fenómenos (modelos de Stephan-Boltzman y de Fourier respectivamente). Esto está fuera de los objetivos de este trabajo, por lo que solo se toman en cuenta de manera cualitativa para deducir algunas conclusiones. Debido a esto la temperatura mínima del baño es de 570 °C, sin embargo al fondo del horno se podrían alcanzar hasta 800 °C.

El aumento en el rendimiento del proceso se debe a la incorporación del blando por inmersión. El calor del baño metálico se transfiere por convección hacia la chatarra sólida. Debido a que ésta posee espesores delgados se alcanza rápidamente la temperatura de fusión. La cantidad de blando que se agrega al baño por inmersión se calculó mediante un balance de energía (Ver Apéndice 2). Las reacciones químicas que se originan por la presencia de contaminantes en el material “blando” son exotérmicas. Este calor se aprovecha para incorporar más material al baño metálico.

4.2 Análisis de la escoria.

La siguiente tabla presenta los tipos y características de la escoria producida.

Tabla 4.2. Tipos de escoria producida.

Tipo de escoria	Escoria terrosa	
Contenido metálico	Bajo contenido metálico.	
Características físicas	Aspecto granular.	
Características químicas	Alúmina y hollín.	
Causas	Movimiento de la escoria constante: escoria situada en la boca del horno se traslada hacia la parte trasera, la escoria de la parte trasera se traslada hacia el frente. Esto favorece la liberación del metal atrapado. Escoria protectora.	
Tipo de escoria	Escoria sobrecalentada	
Contenido metálico	Bajo ó nulo contenido de metal libre.	
Características físicas	Óxidos compactos ("terrones").	
Características químicas	Alúmina, puede contener nitruros.	
Causas	Movimiento de escoria deficiente. Sobrecalentamiento debido a las reacciones de oxidación, su temperatura interna puede llegar a los 2000 °C, lo que aumenta la reactividad del metal en contacto con el "terrón".	
Tipo de escoria	Acero con aluminio adherido	
Contenido metálico	Alto contenido de metal libre.	
Características físicas	Partes de acero con aluminio libre adherido.	
Características químicas	Aluminio libre y acero.	
Causas	Inadecuado acondicionamiento de chatarra. A determinada temperatura comienza la solubilidad del Fe en el aluminio, lo que en ocasiones incrementa sus niveles, contaminando la aleación. La adherencia del aluminio provoca altas pérdidas metálicas.	

4.3 Determinación del contenido metálico en la escoria.

Se evaluó el contenido metálico en la escoria producida en fusiones en las que la proporción de macizo y lingote es superior al 50%, en estas fusiones es factible utilizar fundente escorificante para liberar el metal atrapado en la escoria. Antes de agregar fundente se debe mantener en movimiento la escoria para que se libere calor y también parte del metal atrapado en ésta se libere hacia el baño metálico. En la fusión de blando se genera gran cantidad de calor por lo que no se agrega fundente.

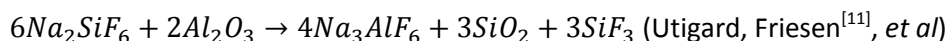
El fundente escorificante promueve la liberación del metal de la escoria, por lo que el contenido metálico en esta disminuirá a medida que se utiliza. La cantidad de fundente utilizada fue de 1 Kg por tonelada de metal. Esta proporción es especificación del proveedor. La gráfica 3.9 en general muestra ésta tendencia excepto en la muestra 5 de la escoria procedente del proceso donde se utilizó fundente escorificante. En éste fenómeno intervienen otros factores como la agitación mecánica de la escoria y el escoriado, procesos que son difíciles de controlar y en los que ocurre arrastre de metal.

Se utilizó un fundente escorificante comercial a base de sales con la composición química mostrada en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Composición química del fundente escorificante utilizado.

Hexafluoruro de sodio y aluminio (Criolita)	Na_3AlF_6	Balance
Hexafluorosilicato de sodio	Na_2SiF_6	92 %
Hidrogensulfato de sodio	$NaHSO_4$	Balance
Cloruro de sodio	$NaCl$	Balance

La reacción química de hexafluorosilicato de sodio Na_2SiF_6 es la siguiente:



Estos compuestos reaccionan exotérmicamente proporcionando calor y en consecuencia aumentan la fluidez del metal atrapado, que acompañado de una agitación mecánica adecuada rompen la red de escoria y se libera el aluminio hacia el baño metálico.

Si no se controla la temperatura de la escoria al agregar el fundente, ésta se sobre calienta excesivamente, aumentando la reactividad del sistema. Para fusiones donde se trabaja con una mayor proporción de material “blando”, no se utilizó fundente ya que las reacciones exotérmicas que toman lugar al introducir el blando al horno hacen que la temperatura del baño aumente. Si se agrega fundente se puede rebasar la temperatura crítica de la escoria y sobrecalentarse, lo que elevará las pérdidas de metal.

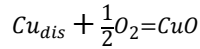
En las fusiones de material “blando” la escoria atrapa pequeñas cantidades de metal, que, debido a su poca cantidad de masa no vence las fuerzas de tensión superficial de la escoria, la agitación ayuda a su liberación.

De éste trabajo se concluyen los siguientes puntos, para la disminución de escoria en el proceso de producción de aleaciones, a partir de chatarra de aluminio.

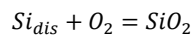
1. Se diseño una técnica de fusión de chatarra con la que se obtienen rendimientos de proceso mayores a los de la técnica convencional.
2. Los materiales de carga (chatarras) con relaciones $\text{área superficial}/\text{masa} > 1$ presentan mayores tasas de oxidación en comparación a los materiales donde esta relación es menor que 1.
3. En las fusiones donde la mayor parte de material procesado poseen una relación $\text{área superficial}/\text{masa} < 1$ se obtiene mayor rendimiento metalúrgico.
4. La incorporación, por inmersión en un baño metálico, de materiales con relaciones $\text{área superficial}/\text{masa} > 1$ aumenta el rendimiento metalúrgico.
5. El contacto directo de materiales con relaciones $\text{área superficial}/\text{masa} > 1$, con la flama de los quemadores, favorece su oxidación y genera mayor cantidad de escoria.
6. El movimiento continuo de la capa de escoria evita su sobrecalentamiento y consecuentemente pérdidas de metal.
7. Las fusiones en las que se procesa gran cantidad de material con relaciones $\text{área superficial}/\text{masa} > 1$ no se tratan con fundente escorificante ya que generan gran cantidad de calor y aumentan las reacciones del metal.
8. El fundente escorificante promueve reacciones exotérmicas que sobrecalientan la escoria si no se controla su temperatura.
9. La escoria sobrecalentada favorece las reacciones del metal, por lo que debe retirarse al momento de su formación.
10. Se detectaron pérdidas de aluminio significativas debido a su adherencia en el material ferroso.

Apéndice 1. Oxidación de elementos disueltos en el aluminio.

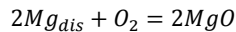
Los elementos aleantes que contiene de manera intrínseca la chatarra pueden oxidarse o reaccionar con otros agentes que se encuentren en la chatarra. Esto se determina con base a los rendimientos porcentuales de los aleantes a partir del diagrama de Ellingham para óxidos:



$$K = \frac{a_{CuO}}{a_{Cu} p_{O_2}^{1/2}} = \frac{1}{p_{O_2}^{1/2}}$$



$$K = \frac{a_{SiO_2}}{a_{Cu} p_{O_2}} = \frac{1}{p_{O_2}}$$



$$K = \frac{a_{MgO}^2}{a_{Mg}^2 p_{O_2}} = \frac{1}{p_{O_2}}$$

Las reacciones ocurren en disolución (el aluminio líquido es el disolvente). Si se tienen $n_{O_2}^T$ (n moles totales de oxígeno en disolución) de acuerdo a la termodinámica la mayoría reaccionarán estequiométricamente con el aluminio según la reacción $Al + \frac{3}{2}O_2 = Al_2O_3$, las reacciones con el Cu y Si se llevarán a cabo con el oxígeno restante. El rendimiento de los aleantes se determina:

$$Rendimiento\ del\ Cu = \frac{n_{CuO}^{Cu}}{n_{Cu}} * 100, \text{ Rendimiento\ del\ Si} = \frac{n_{SiO_2}^{Si}}{n_{Si}} * 100$$

Donde n_{CuO}^{Cu} son las moles de Cu que reaccionaron y produjeron CuO, estas moles provienen de la carga total de cobre cargado para alear: n_{Cu} . A la temperatura del sistema (700°C-800°C) p_{O_2} es muy pequeña (por lo tanto K es grande) sin embargo el oxígeno reacciona primero con el aluminio dando tiempo a la disolución del cobre y el silicio, solo una pequeña parte de estos reacciona, en general el 2%. La figura A muestra el diagrama de Ellingham para óxidos de los principales elementos de aleación presentes en las aleaciones de aluminio.

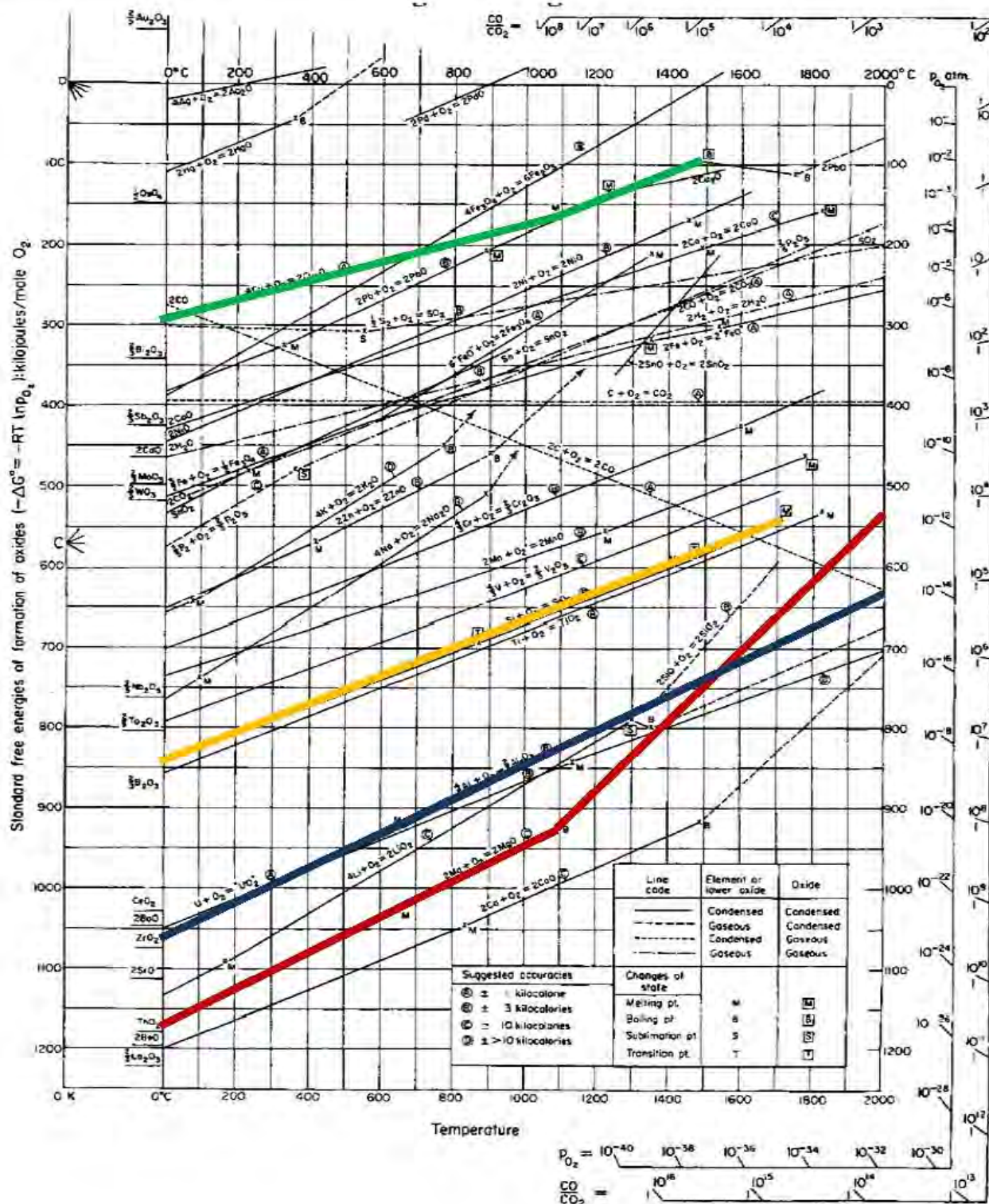


Figura A. Diagrama de Ellingham para la formación de óxidos, de los principales elementos aleantes en las aleaciones de aluminio (De Richardson and Jeffes, Iron and Steel Institute).

Apéndice 2. Determinación de la cantidad optima de material “blando” que se debe agregar al metal líquido.

Se realiza un balance de energía para determinar la cantidad de material “blando” que se debe diluir en el baño sin que se rebase la temperatura *solidus*.

$$Q_{metal\ líq} = -Q_{chatarra}$$

$$m_{metal\ líq} C_{p,Al(l)} (T_{eq} - T_{metal\ líq}) = -[m_{chatarra} C_{p,Al(s)} (T_{eq} - T_{chatarra})]$$

Si se considera que $C_{p,Al(l)} = C_{p,Al(s)}$, entonces:

$$m_{chatarra} = -m_{metal\ líq} \left[\frac{(T_{equilibrio} - T_{metal\ líq})}{(T_{equilibrio} - T_{chatarra})} \right]$$

Apéndice 3. Determinación de los parámetros de proceso.

- Rendimiento de la chatarra.

$$Rendimiento\ de\ la\ chatarra = \left[\frac{Metal\ recuperado}{Chatarra\ procesada + Aleantes} \right] 100$$

- Contenido de aluminio en la chatarra.

$$Contenido\ de\ Al\ en\ la\ chatarra = Materia\ prima\ procesada - Material\ ferroso.$$

- Rendimiento metalúrgico.

$$Rendimiento\ metalúrgico = \left[\frac{Metal\ recuperado}{Contenido\ de\ Al\ en\ la\ chatarra + Aleantes} \right] 100$$

1. Taylor, J. A. (2006). "Oxidation, dross and melt loss issues involved in the handling of molten aluminum alloys", 2006 Australasian Foundry Conference, 15-18 Oct 2006, Rotorua New Zealand.
2. M.E. Schlesinger, "Aluminum Recycling", CRC Press Taylor and Francis Group, USA, 2007.
3. Y. Wu, R. Bui, "Modeling the cylindrical scrap aluminum remelter", Light Metals 1994, TMS, pp 855-861.
4. David J. Roth, Andrew R. Beevis, "Maximizing the aluminum recovered from your dross and elimination of any waste products in dross recycling", Light metals 1995, TMS, pp 815-817.
5. B. Zhou, Y. Yang, M. A. Reuter, "Study of Melting Behavior of Aluminum Scraps in Molten Melts", Delft University of Technology The Netherlands, 2004.
6. Y. Xiao, M.A. Reuter, "Recycling of distributed aluminum turning scrap", Delft University of Technology, The Netherlands, 2002.
7. Nakajima, Takeda, "Thermodynamic analysis of contamination by alloying elements in aluminum recycling", Research Center of Material Cycles and Waste Management, 2010.
8. Manfredi, Wuth, Bohlinger, "Characterizing the physical and chemical properties of aluminum dross, JOM, TMS, November 1997, pp 48-57.
9. Verran, Kurzawa, "An experimental study of aluminum can recycling using fusion in induction furnace", Resource, Conservation and Recycling 52, 2008, pp 731-736.
10. Cochran, Belitskus, Kinosz, "Oxidation of aluminum-magnesium melts in air, oxygen, flue gas, and carbon dioxide", Metallurgical Transactions B, volume 8B, June 1977, pp 323-332.
11. Utigard, Friesen, Roy, "The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing", JOM, TMS, November 1998, pp 38-43.
12. ASM Metals Handbook Volume 2, Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials. 2001, pp 526-568.
13. ASM Metals Handbook Volume 15, Casting. 2001, pp 706-720.
14. Totten, MacKenzie, Handbook of Aluminum, Volume 2 Processing of Aluminum, Marcel Dekker Inc, 2003, pp 591-691.