



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO METÁLICO DE CHATARRA DE
ALUMINIO EN UN HORNO DE REVERBERO BASCULANTE”**

TESIS

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

PRESENTA:

OMAR MARTÍNEZ ESPINOSA



México, D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

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

VOCAL: Profesor: Dr. José Alejandro García Hinojosa

SECRETARIO: Profesor: M. EN I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

1er. SUPLENTE: Profesor: I.Q.M. Ariadna Abril Balandra Aranzueta

2° SUPLENTE: Profesor: M. EN I. Adrián Manuel Amaro Villeda

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INDUSTRIAL LIGAS METÁLICAS, S.A. DE C.V.

ASESOR DEL TEMA: DR. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

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

SUSTENTANTE: OMAR MARTINEZ ESPINOSA

Agradecimientos

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

Agradezco a la I.Q.M. Eduardo Hernández Tinoco e Industrial Ligas Metálicas por haberme brindado la oportunidad de estar en su recicladora, por su paciencia. Al Dr. José Alejandro García Hinojosa por la dirección de este trabajo por los consejos, el apoyo y el ánimo que me brindó. Al I.Q.M. Eusébio Cándido Atlatenco Tlapanco por su paciencia ante mi inconsistencia, por atenta lectura de este trabajo y, por ultimo pero no menos importante, al M. EN I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo por sus comentarios en todo el proceso de elaboración de la Tesis y sus atinadas correcciones.

Gracias también a mis queridos compañeros, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante estos casi 5 años de convivir dentro y fuera del salón de clase. Mariano, Jess, Sand, Luz, Baez, Anita, Diana, Iovas, EriAny, Anabell, Yema, Beber, Pino.

A mi madre, mi abuela y mis hermanos que me acompañaron en esta aventura que significó la maestría y que, de forma incondicional, entendieron mis ausencias y mis malos momentos. A ti que desde un principio hasta el día hoy sigues dándome ánimo para terminar este proceso.

Gracias a todos.

"Some things will never changes"
2pac Amaru (1971-1996)

CONTENIDO

Resumen

Objetivo

Introducción	1
CAPÍTULO I ANTECEDENTES	
1.1 Sustentabilidad	2
1.2 Reciclaje de aluminio	3
1.3 Métodos de Clasificación de chatarra	4
1.3.1 Clasificación manual	5
1.3.2 Clasificación por aire	5
1.3.3 Separación magnética	6
1.3.4 Separación por corrientes de Foucault	7
1.4 Clasificación y limpieza de la chatarra	7
1.5 Tipos de horno para chatarra de aluminio	8
1.5.1 Horno de crisol	8
1.5.2 Horno de reverbero	9
1.5.3 Horno rotatorio	10
CAPÍTULO II CHATARRA DE ALUMINIO	
2.1 Tipos de chatarra de aluminio	11
2.2 Condición de la chatarra de aluminio	19
2.3 Frecuencia de la chatarra de aluminio en la industria	21
CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO DE FUSIÓN DE CHATARRA DE ALUMINIO	
3.1 Descripción de horno de reverbero de ligas metálicas	23
3.2 Método de fusión del horno de reverbero	25
3.2.1 Pre calentamiento del horno de reverbero	26
3.2.2 Balance de carga	26
3.2.3 Carga del horno	29
3.2.4 Retiro de la escoria	31
3.2.5 Análisis químico	31
3.2.6 Vaciado	31
CAPÍTULO IV DESARROLLO EXPERIMENTAL	
4.1 Rendimiento metálico de la chatarra de aluminio experimental	33
CAPÍTULO V. RENDIMIENTO METALICO	
5.1. Rendimiento metálico para la aleación 380.0	36

5.2. Rendimientos metálicos para la aleación Al9Si3Cu	40
5.3. Comparación del rendimiento de metal entre las aleaciones 380 y Al9Si3Cu	43
5.4. Efecto de chatarras particulares en el rendimiento de metal	44
5.4.1. Efecto del bote de aluminio	44
5.4.2. Efecto de rines automotrices.	45
5.4.3. Efecto de chatarra de suela de plancha	48
5.4.4. Efecto de chatarra de radiador	50
5.5 Análisis del balance de carga de Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.	52
CAPITULO VI. CONCLUSIONES	62
INDICE DE FIGURAS	64
INDICE DE TABLAS	65
INDICE DE GRÁFICAS	66
BIBLIOGRAFÍA	68

Resumen

En este trabajo de tesis se evaluó el rendimiento del metal recuperado en el proceso de fabricación de las aleaciones 380.0 y Al9Si3Cu, enfatizando el efecto de la limpieza de la chatarra, de acuerdo a su clasificación se realizaron fusiones combinando chatarra de conformado mecánico (laminación, extrusión, trefilado, etc.) y chatarra de fundición (moldeo en verde, colada a presión, molde permanente, etc.) con condiciones de limpieza sucia y limpia. Los resultados indican que cargas al horno de chatarra de fundición y limpias promueven los valores más altos de rendimiento de metal en el proceso de reciclado.

Objetivos:

- Conocer las ventajas y desventajas en el proceso de reciclaje de la chatarra de conformado mecánico y de chatarra de fundición.
- Evaluar los rendimientos de metal recuperado en la producción de aleaciones 380.0 y Al9Si3Cu, con diferentes combinaciones de chatarra de conformado con chatarra de fundición.
- Evaluar el efecto de algunas chatarras específicas representativas sobre la recuperación de metal en el proceso de reciclado.

INTRODUCCIÓN

Proteger el ambiente, evitar desaprovechamientos de recursos naturales no renovables y utilizar la energía mas racionalmente, son las mayores preocupaciones de nuestra sociedad.

La producción a escala industrial y el uso de metal de aluminio tiene apenas un siglo de antigüedad, sin embargo, la industria ha crecido hasta que quede en segundo lugar a comparación con la industria del acero entre los productores de metales.

El reciclaje de la chatarra de aluminio empezó a llevarse a cabo en Estado Unidos en el año 1900 pero en una escala mínima. Debido a esto en los años de 1950 a 1960 la producción de aluminio secundario empezó investigarse más y el aluminio secundario siguió en aumento. A partir de finales de 1960, el gobierno comenzó a preocuparse por la cantidad de residuos desechados por las sociedades industriales. El aumento de la chatarra a partir de 1970 tuvo como consecuencia grandes esfuerzos para recolectar y reciclar.

En África, Norte América, Sur América, Asia, Europa, Oceanía tienen una industria de reciclaje, donde Norteamérica es uno de los mayores productores de aluminio secundario a nivel mundial. En México los depósitos de bauxita son nulos, por lo que todo el aluminio que se utiliza se tiene que importar para poder satisfacer las necesidades en algunos productos de uso cotidiano.

La industria del reciclaje de aluminio está en crecimiento en México debido a la energía utilizada para obtener aluminio primario es mayor que para obtener aluminio secundario. Esto se ve reflejado en el precio del aluminio secundario en el mercado.

Los factores a tomar en cuenta en el reciclaje de aluminio es tener un suministro periódico y abundante, una infraestructura adecuada para su limpieza y su tratamiento y un proceso que sea económicamente competitiva.

Se pueden usar todo tipo de hornos de fusión de aluminio para poder reciclar la chatarra de aluminio pero en los últimos años los hornos con los que se procesa son el de reverbero y el horno rotatorio. Para obtener el mayor rendimiento de la chatarra se tienen muchas consideraciones por la gran gama de chatarras existentes actualmente, lo cual las condiciones de cada una de ellas no se pueden generalizar su proceso.

El rendimiento de la chatarra de aluminio depende de factores de limpieza, tipo de chatarra, secuencia de carga, tiempos de fusión y forma de trabajo, donde cada uno de ellas es la suma de los factores para obtener un mayor rendimiento, es decir, se tiene que llevar una técnica de fusión adecuada.

El Ingeniero Químico Metalúrgico está involucrado tiene un objetivo en la industria de aluminio secundario el cual es fomentar una cultura de reciclaje de aluminio secundario, así como un buen tratamiento económicamente costeable aprovechando al máximo la chatarra de aluminio controlando a su vez las emisiones contaminantes y mejorando constantemente su proceso.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 Sustentabilidad

En la actualidad se calcula que el 40% de los residuos urbanos están compuestos por productos desechables. Con el crecimiento poblacional e industrial, los lugares para enterrar los desechos industriales y sanitarios están escaseando, aquí es donde se empieza fomentar la cultura del reciclaje, siempre y cuando este resulte viable.

En el caso del aluminio es 100% reciclable, el aluminio en desuso puede convertirse en aluminio nuevo sin que sus propiedades se vean afectadas y su proceso necesita de poca energía a comparación del aluminio primario.

El aluminio hoy en día es uno de los principales desechos urbanos ya que se le encuentra en consumibles, piezas automotrices, cables, accesorios de cocina y en la industria de la construcción.

La metalurgia secundaria del aluminio, permite una economía de materias primas y de energía. El aluminio reciclado substituye aluminio primario con una reducción del 95% de energía utilizada, figura 1.1.

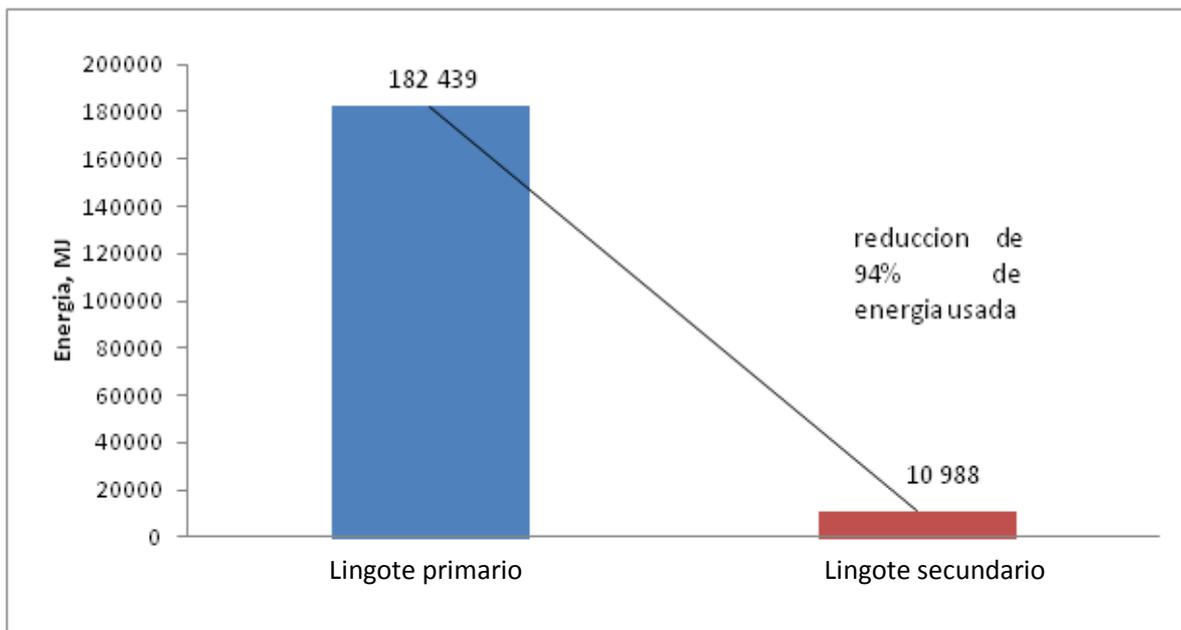


Figura 1.1. Energía consumida de aluminio secundario en comparación con aluminio primario, excluyendo la energía de transporte.

Otro aspecto positivo de reciclaje de aluminio es el impacto al medio ambiente. La producción de una tonelada métrica de aluminio primario requiere cerca de cuatro toneladas métricas de bauxita y los subproductos generados son de una tonelada y media de lodos rojos y media tonelada de desechos sólidos, la cual este proceso tiene emisiones de dióxidos de azufre provocando lluvia ácida.

Consecuentemente, el balance de energía favorable hace que el aluminio sea un excelente producto a reciclar, otra ventaja del reciclaje de aluminio es el valor agregado que tiene en el mercado sobre otros materiales.

El reciclaje para todo material no renovable es una consideración para seguir con su uso, el aluminio reciclado tiene sus atributos con implicaciones de gran alcance económico, ecológico y social. En vista de la creciente demanda de aluminio en el mundo, se empieza a maximizar métodos de recolección de todo el aluminio que hay disponible y desarrollar su tratamiento eficiente. La importancia de fomentar un reciclaje eficiente se adaptara a las restricciones energéticas en un futuro. La economía del aluminio es una economía cíclica. Si una pequeña cantidad de chatarra de aluminio es procesada adecuadamente, el aluminio obtenido puede ser utilizado para casi todas las aplicaciones que tiene el aluminio.ss

1.2 Reciclaje de Aluminio

En la figura 1.2, en 1990 la producción global de aluminio fue de 28 millones de toneladas de las cuales 8 millones son de aluminio reciclado, en el 2010 la cantidad ascendía a 56 millones de toneladas de estos 18 millones son de aluminio reciclado. Se proyecta que para el 2020 la demanda de aluminio global alcanzara los 97 millones de toneladas de aluminio de los cuales 31 millones de toneladas de corresponden a aluminio reciclado¹.

La industria del aluminio es causante directamente del 1% de gases invernadero, donde el 40% vienen del proceso de aluminio y el 60% de la electricidad usada (emisiones indirectas). Se ha creado una iniciativa global de sostenibilidad donde se fomenta el uso, reciclando y reutilizado, la estrategia incluye:

- 1.- Después de una reducción de las emisiones en un 86% ejercido de 1990 a 2006 se planea reducir un 50% más las emisiones de aluminio para el año 2020.
- 2.- Una reducción de 10% de energía eléctrica utilizada por cada fusión.
- 3.- La industria del aluminio reciclado fomentara el reciclado del 75% de latas usadas de aluminio para el 2015.

¹ Cifras obtenidas de "Aluminum Recycling Europe (ARE)" en 2007

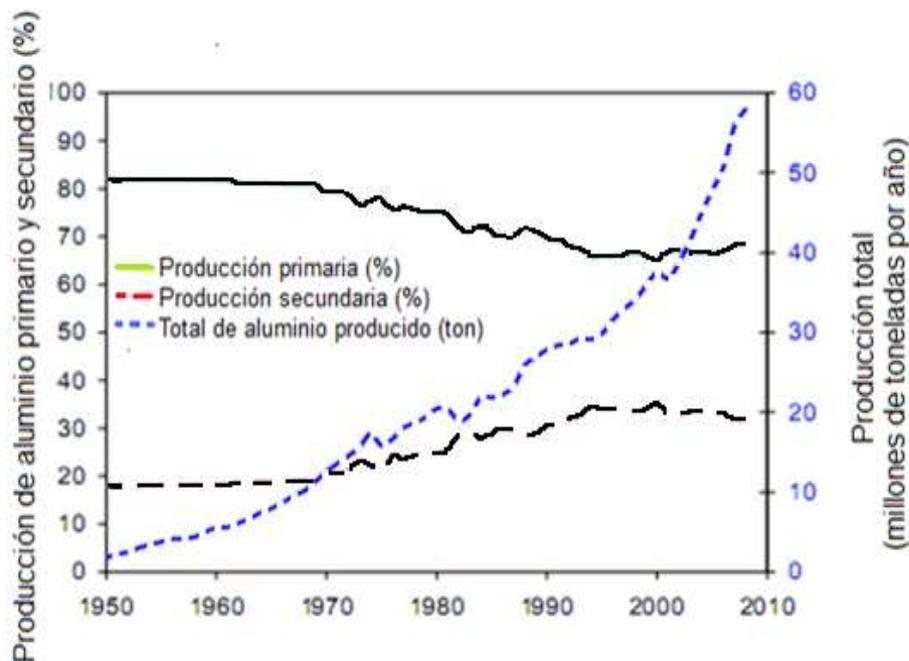


Figura 1.2. Producción de aluminios primario y secundario global².

En muchos países del mundo hay industrias recicladoras de chatarra, pero el reciclaje juega un papel principal en Europa, América del norte y Japón. Una industria evolucionada en el reciclaje aluminio procesa una pequeña cantidad de aluminio reciclado y produce aluminio normalizado.

1.3 Métodos de Clasificación de chatarra

La chatarra de aluminio se presenta en una amplia variedad de tamaños y condiciones. Las piezas pueden ser tan pequeñas como los cables de aluminio utilizados en equipos electrónicos o tan grandes como el fuselaje de un avión. No muy comúnmente está libre de cualquier pieza adjunta a otros materiales, frecuentemente se encuentran atornilladas, soldadas o fijadas de otro modo a otras partes. Con el fin de ser fundidos, la chatarra tiene que ser separado de estos materiales.

Muchos procesos de selección requieren piezas de chatarra de un tamaño determinado para ser separada rápidamente. El tamaño constante de partículas es también esencial para el buen funcionamiento de algunos dispositivos de clasificación. Algunos desechos ya tienen el tamaño adecuado para la clasificación automática, pero la mayoría no lo hace. La Trituración es el proceso mediante el cual se reduce el material de gran tamaño al tamaño adecuado para su posterior procesamiento. La trituración de los minerales de origen natural se hace generalmente por aplastamiento en pequeñas rocas. Sin embargo, la chatarra de metal no se pueden convertir en partes más pequeñas de esta manera. En su lugar, debe ser fragmentado. Muchos dispositivos se han inventado para fragmentación de la chatarra. Se divide en tres categorías: cizallas, trituradoras de impacto y trituradoras rotatorias.

² "Producción de aluminio primario y secundario %" ARE 2007

1.3.1 Clasificación manual

Como su nombre lo indica, este proceso debe ir a través de una banda de alimentación, y se eliminan los elementos indeseables a mano, donde se colocan en contenedores separados para su posterior procesamiento. Fue el primer método utilizado para clasificar la basura o desechos y sigue siendo popular.

Se puede incluir una parte magnética para separar componentes ferrosos ayudando a reducir los niveles de impurezas en la chatarra. La fracción no magnética frecuentemente es separada a mano.

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

La clasificación manual utiliza herramientas de reconocimiento visual para distinguir los elementos deseables. El color es un indicador que permite la separación de elementos metálicos de los no metálicos y el cual permite la separación de metales como cobre, latón, plomo, etc.

La chatarra de aluminio suele ser acompañada de acero, acero inoxidable, plástico, plomo, donde el reto de la recuperación de aluminio es separarlo de estos materiales. La selección manual tiene sus limitaciones, las piezas de metal que son pintadas o chapadas con un metal pueden ser identificadas erróneamente. Las piezas de metal se fabrican con diferentes aleaciones, por lo que el reconocimiento de estas no es suficiente para separar por tipo de metales. Por último, si los costos laborales son muy altos, el valor de los materiales recuperados no puede justificar el costo de la clasificación.

1.3.2 Clasificación por aire

La chatarra de metal a menudo contiene niveles de impurezas de baja densidad. Estos principales tipos de desechos urbanos se componen de plástico y papel. Una fuente reciente de chatarra es la chatarra electrónica, en particular tablas y circuitos. Estas contienen en su mayoría plástico que debe ser separada del metal.

Cuando la fracción de baja densidad en la materia prima es mucho mayor que la del metal que se recupera, los aparatos por clasificación por aire son útiles. Se utiliza un flujo ascendente para levantar el papel y el plástico del metal.

Se muestra en la figura 1.3, el esquema de un clasificador por aire en zigzag, el aire es inyectado a través de la parte inferior empujando el material de baja densidad hacia arriba y afuera al mismo tiempo que los materiales densos caen al fondo. El diseño en zigzag evita que el papel y el metal se peguen entre sí o bloqueen un camino gracias a la turbulencia generada.

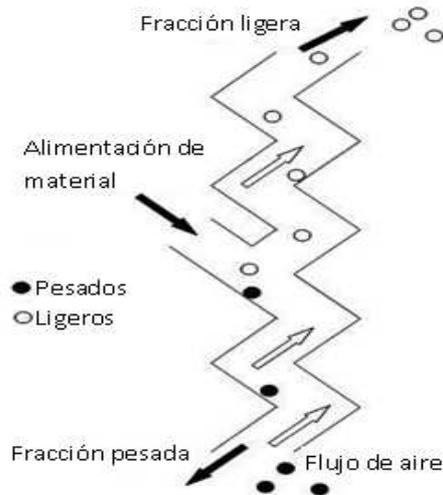


Figura 1.3. Clasificación por aire en Zigzag

1.3.3 Separación Magnética

La separación magnética es uno de los pasos más sencillos en la separación de chatarra de aluminio. Su objetivo es eliminar el acero y las aleaciones de níquel. Existe una amplia gama de separadores de este tipo, donde los más comunes son los de tambor. El imán de tambor es un imán fijo que gira alrededor de su eje, el material no magnético cae del tambor y se recoge en una cinta transportadora, el material magnético se pega al tambor y continúa haciéndolo hasta que el tambor gire más allá del campo generado por el imán entonces más adelante cae y se retira independientemente.

En la figura 1.4 se muestra el separador donde su objetivo es limpiar el material magnético de cualquier material no magnético. En las plantas se trata de eliminar la impureza de ferrosos a partir de la fracción de no ferrosos, donde está a su vez puede pasar por un segundo imán o los que sean necesarios para su limpieza. La contaminación de hierro en la chatarra de aluminio es cada vez más inaceptable. Por lo que se este tipo de separación es para la mejora de la chatarra antes de la carga de un horno para la refundición.

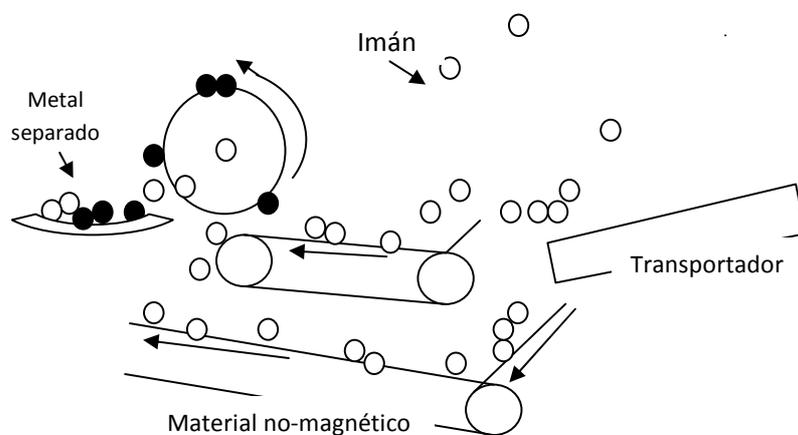


Figura 1.4. Separación magnética con auto desmenuzador.

1.3.4 Separación por corrientes de Eddy

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

Cuando una partícula pasa por el campo magnético generado por un imán de polaridad inversa, este campo magnético secundario se opone al campo magnético principal. Este crea una fuerza repulsiva que envuelve a la partícula y se vuelve a alinear con el nuevo campo magnético primario desviando a la partícula de su dirección original. Un ejemplo es el magnesio y el aluminio tiene una conductividad alta y baja densidad, esto significa que pueden ser fácilmente desviados al pasar por imanes de polaridad alterna. El cobre también es buen conductor, pero la densidad es mucho mayor, como resultado la chatarra de cobre se ve menos afectada por la alternancia de estos campos. El plástico y el papel no son conductores, por lo tanto no se ven afectados por los campos magnéticos, esto se puede ilustrar con la figura 1.5.

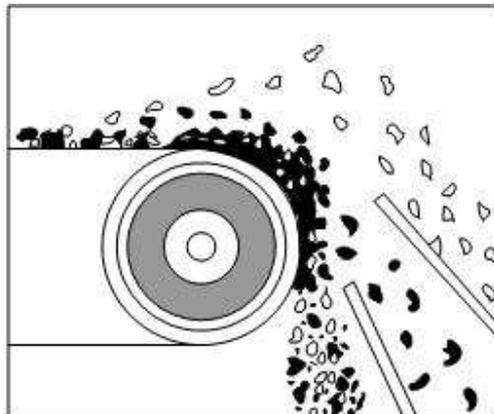


Figura 1.5. Separador por corrientes de Eddy de tipo transportador.

1.4 Clasificación y limpieza de las piezas

La chatarra se puede clasificar en varias categorías de acuerdo a:

- Tipo de proceso proveniente (fundición o conformado mecánico).
- Condiciones en las que se encuentra (oxidación, suciedad... etc.).
- Composición química (tipo de aleación).

La clasificación tiene como objetivo saber las condiciones de la chatarra, su proceso de fabricación, su uso y a la familia de aleaciones que pertenece. Esto se especifica para hacer una buena planeación y una buena técnica de fusión para cada clasificación. La técnica de fusión se especifica para cada tipo de chatarra clasificada debido a diferentes comportamientos en la fusión.

La industria tiene una tendencia por una clasificación por proceso de fabricación, donde estos son:

1) Chatarra de extrusión: se incluyen artículos o productos para las industrias de construcción transporte, electricidad, línea blanca y mobiliaria, principalmente en forma de barras, perfiles o tubos.

2) Chatarra de laminación: se incluyen igualmente productos para las industrias de la construcción, transporte, electricidad, línea blanca y se agregan la industria litográfica y destacando el envasado de bebidas y alimentos.

3) Chatarra de fundición: se presentan chatarras de aluminio proveniente de moldeo en verde, fundición a presión y molde permanente principalmente. Se pueden tener chatarras por fundición centrifugada. Esta última no es frecuente.

En la chatarra de fundición se puede encontrar una gran variedad de piezas de tipo de construcción, doméstico, automotriz, electrónica, etc. Las proporciones de cada una se muestran en la figura 1.6.

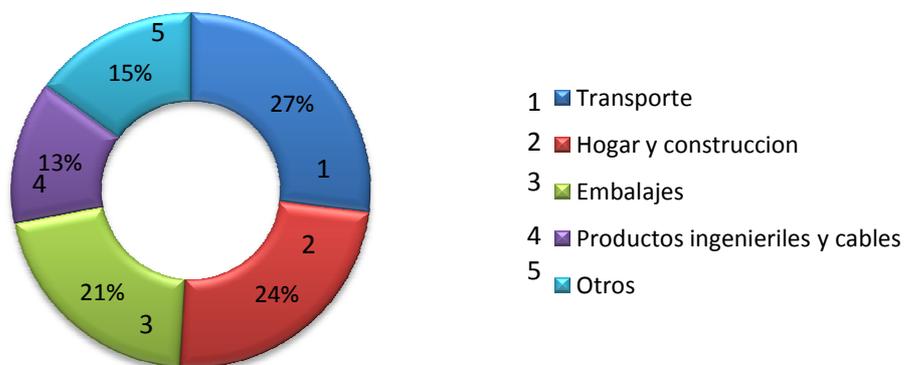


Figura 1.6. Mercado global de chatarras de aluminio³.

1.5 Tipos de Hornos

1.5.1 Horno de crisol

Los crisoles son recipientes de arcilla mezclada con grafito y otros materiales refractarios, provistos de tapa, que una vez cargados y cerrados se calientan en los denominados hornos de crisoles, utilizando como combustible gas o diesel.

La fusión en crisoles es uno de los procedimientos más antiguos y sencillos para elaborar aleaciones, y todavía se emplea, y probablemente se empleara siempre por la economía de su instalación.

Los hornos de crisol clásicos eran de tipo de foso, y se colocaban en ellos los crisoles rodeados de carbón, a una distancia mínima de 10cm. de las paredes del horno.

Pero los hornos de crisoles más modernos se construyen para el calentamiento de un solo crisol, cuya parte superior sobresale del horno. Si los hornos son fijos se extrae el metal con cuchara, pero también se construyen hornos de crisol basculantes, en los que la colada resulta más cómoda. En estos tipos de hornos se calienta primero el crisol vacío, hasta que llega al rojo cereza y después se cargan con chatarra.

La ventaja de los hornos de crisoles modernos, tanto fijos como basculantes, es que la carga queda totalmente aislada, y por tanto, no se altera su composición por efecto de los gases producidos en la combustión.

³ Mercado de chatarra en Europa (ARE), 2007.

1.5.2 Horno de reverbero

El horno de reverbero se utiliza para la fundición de piezas de grandes dimensiones, tanto de metales férreos como de metales no férreos, como cobre latón, bronce y aluminio. Los hornos de reverbero son de poca altura y gran longitud. En uno de los extremos se encuentra el hogar donde se quema el combustible, y en el extremo opuesto la chimenea. Las flamas y productos de la combustión atraviesan el horno y son dirigidos, por la bóveda de forma adecuada hacia donde está situada la carga del metal que se desea fundir. Esta carga se calienta, no solo por su contacto con las llamas y gases calientes sino también por el calor de radiación de la bóveda del mismo horno. La capacidad de los hornos de reverbero es muy variable y oscila entre los 45 Kg. y las 20 toneladas.

Las tecnologías de combustión con oxígeno en los hornos de reverbero para fusión de aluminio permiten, con respecto a la utilización de quemadores de aire frío:

- Incrementar la producción alrededor del 50%
- Reducir el consumo energético entre un 40 y un 50%
- Reducir el volumen de humos emitidos en más del 70%
- Reducir las oxidaciones del aluminio en más de un 20%

Los hornos de tambor cilíndricos, basculantes figura 1.7, están diseñados para aprovechar la configuración natural en arco a fin de ofrecer un horno de fundición compacto tanto productivo como económico. El revestimiento refractario y el armazón de acero ofrecen la mayor resistencia a la expansión térmica o distorsión de movimiento. Este diseño produce mejor transferencia térmica para una mayor velocidad de fusión. Al girar toda la cámara del horno sobre su base, se logra un vertido controlado sin la necesidad de utilizar equipos complejos.



Figura 1.7. Horno cilíndrico de reverbero basculante⁴.

⁴ Horno de tambor basculante SECO/WARWICK.

1.5.3 Hornos rotatorios

Para desechos altamente oxidados, el uso de fluxes o fundentes durante la fusión es un requisito. La separación de la escoria del metal es difícil, sin agitación suficiente.

Los hornos rotatorios están formados por una envoltura cilíndrica de acero. En uno de los extremos está situado el quemador y en el otro la salida de los gases de combustión, que generalmente pasan por un sistema de recuperación de calor para precalentar el aire de soplado antes de ser evacuados por la chimenea. Todo el interior del horno está revestido con un material refractario.

Los hornos rotatorios se han considerado como hornos de reverbero perfeccionados, ya que además de calentarse la carga por el contacto de flamas y gases y por la radiación del refractario caliente, se calienta también por el contacto directo con la parte superior del horno, que al girar queda bajo la carga. Con esto se consigue un notable acortamiento del tiempo de fusión, pues se logra evitar el efecto aislante de la capa de escorias, que flota sobre el baño.

La capacidad de los hornos rotativos para la fusión de los metales varía ordinariamente entre los 50 kg. y las 15 Toneladas. También se construyen hornos oscilantes que no llegan a girar, sino solamente oscilan de un lado a otro

El horno rotatorio figura 1.8, es un tubo inclinado hacia atrás para cargar e inclinado hacia adelante para la descarga de escoria y metal fundido. El gas de escape calienta las paredes del material refractario del horno, lo que permite el calentamiento de la carga por la conducción de las paredes, así como por radiación y convección. Cuando la carga ha alcanzado la temperatura deseada, el horno se inclina y el metal y la escoria se vierte fuera. La rotación del horno es lenta durante las primeras etapas del proceso de fusión, para evitar daños en los ladrillos refractarios y la velocidad se incrementa hasta aproximadamente 7 a 8 m/s en la superficie interior. Los tiempos de fusión varían con el tamaño del horno y de carga, pero son generalmente más cortos que en un horno de reverbero.

Los hornos rotatorios son más rápidos y más eficientes que los hornos de reverbero, sin embargo, también son más caros de instalar y más difícil de mantener. Como resultado, en general son más adecuados para la fusión de la chatarra. Desechos de tamaño pequeño, tales como rebabas y virutas son más adecuados para un horno de agitación, en el que se pueden fundir en un entorno libre de escoria.

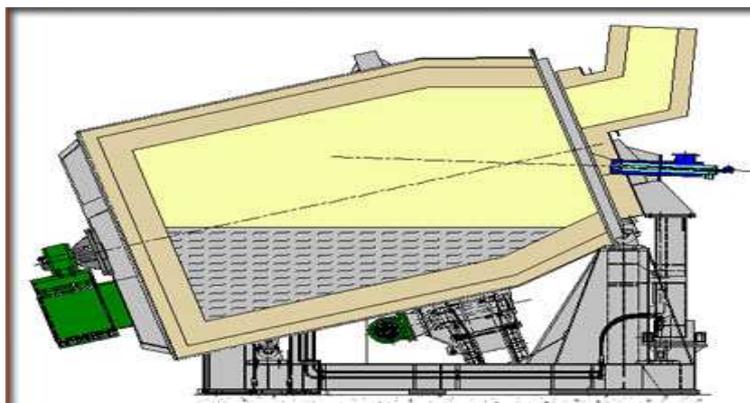


Figura 1.8. Horno rotatorio.

Capítulo II.- Chatarra de aluminio

Los factores que determinan el rendimiento de la chatarra tratados en este trabajo son el tipo y la composición química de la carga, que consideran los tiempos de trabajo y las propiedades de cada chatarra.

La chatarra de aluminio puede venir en muchas formas, nivel de limpieza o suciedad y tamaños, etc. Esto sirve para poder identificar a cada una de las chatarras.

2.1 Tipos de chatarra y características

En la chatarra de aluminio existe una extensa gama de piezas, con diferentes tamaños y composiciones químicas.

La chatarra de aluminio se clasifica por proceso de fabricación, ayuda para saber su composición química. En las figuras 2.1 y 2.2 se muestra la clasificación de la chatarra dependiendo del su proceso de fabricación.

Como se menciona la chatarra se puede clasificar en varias categorías:

- Tipo de proceso proveniente (fundición, conformado mecánico)
- Condiciones en las que se encuentra (oxidación, suciedad... etc.)
- Composición química (tipo de aleación)

La clasificación se especifica para hacer una buena planeación para cada tipo de aleación a fabricar, esto se ve reflejado en la composición química final del lingote obtenido. En la clasificación Industrial se separa de una manera muy general, chatarra de aluminio de fundición y chatarra de aluminio de conformado metálico y su descripción es la siguiente:

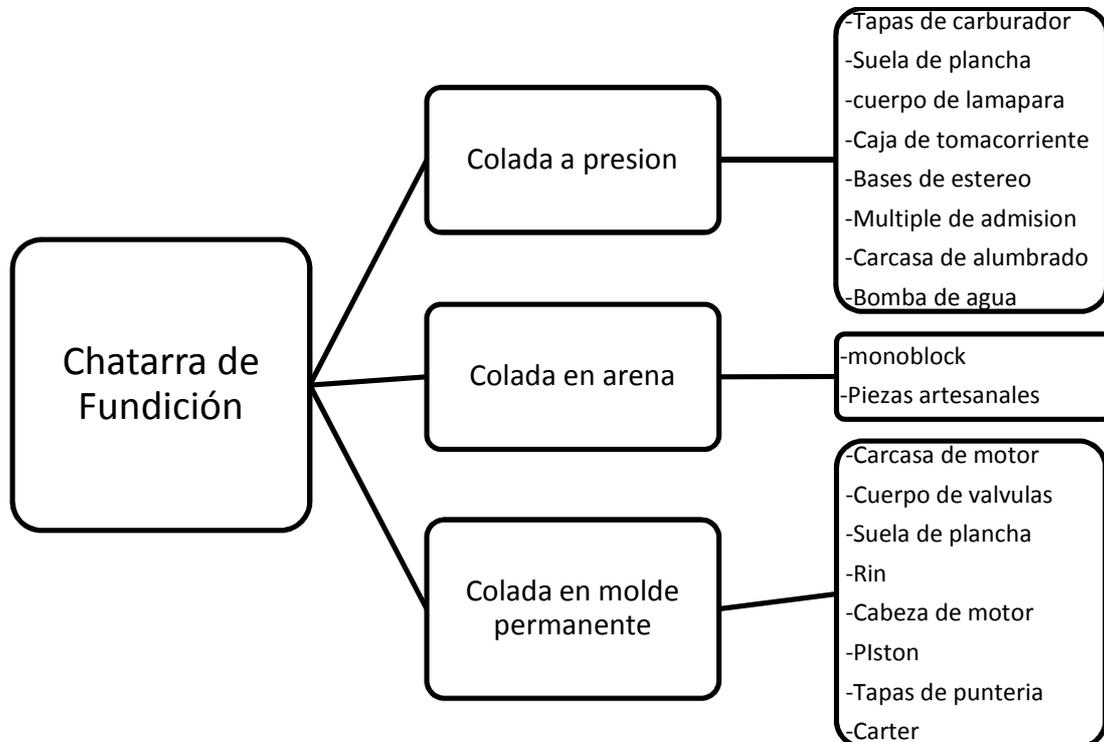


Figura 2.1. Diagrama de clasificación de chatarra de fundición de acuerdo al proceso de fundición.

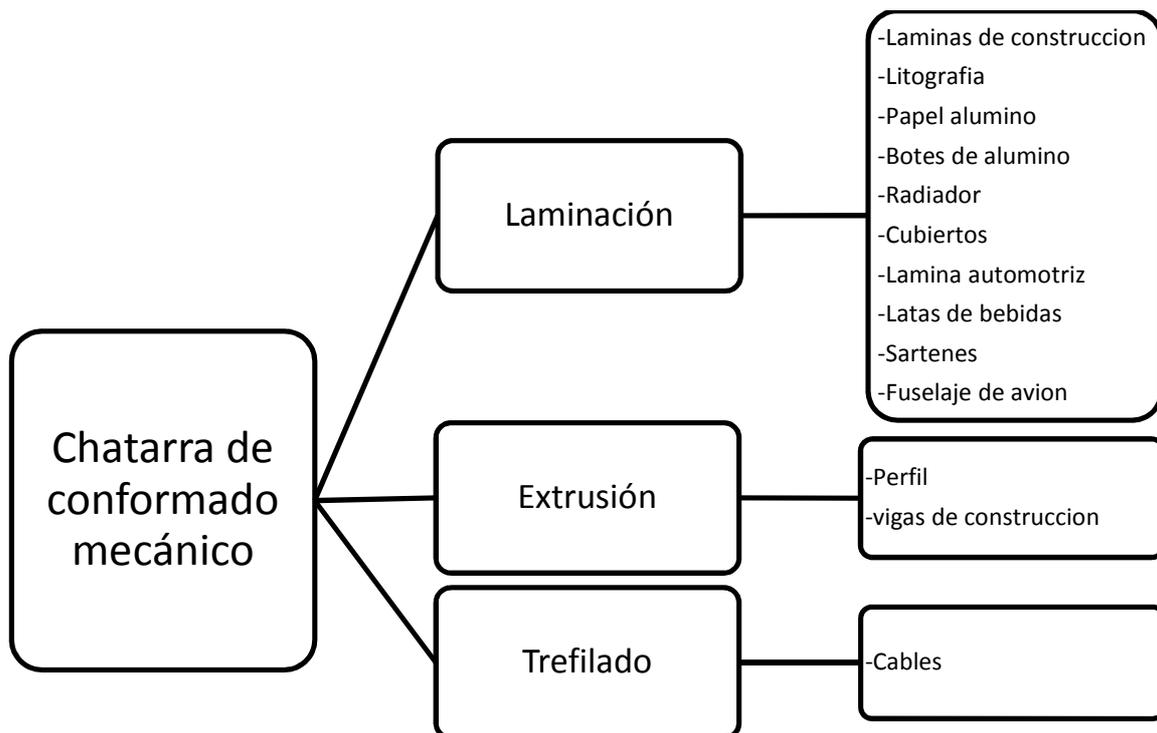


Figura 2.2. Diagrama de clasificación de chatarra de conformado de acuerdo a su proceso metalmeccánico.

a) Chatarra de aluminio de conformado mecánico: piezas metal-mecánicas obtenidas por un proceso de conformado mecánico esto pueden ser embutido, extrusión, trefilado, troquelado, laminación entre muchos otros.

b) Chatarra de aluminio de fundición: piezas de metal obtenidas por colada a presión, arena en verde, molde permanente y otros procesos.

Las piezas más comunes que se encuentran en la chatarra de conformado son: botes de desodorante, latas de refresco, rebabas, perfil, utensilios de cocina, lamina de automóviles, laminas de construcción, lamina litográfica, papel de aluminio y cables. Cada uno de este tipo de chatarra tiene recubrimientos orgánicos como pinturas, lacas, recubrimientos con otros metales, etc.

En la chatarra de fundición se puede encontrar una gran variedad de piezas de tipo de construcción, domestico, automotriz, electrónica, etc., este tipo de chatarra viene acompañada generalmente de grasas y polvo. Cada una de estas chatarras tiene una gran variedad de composiciones química, tabla 2.1, las piezas mostradas son las más representativas.

La introducción de la chatarra al horno es auxiliada por cajas de acero llamadas “tolvas”, debido a la forma, tamaño y al número de piezas que llenan la “tolva” y depende de esto el número de pasos.

El volumen de la chatarra de conformado mecánico es mayor a la chatarra de fundición, debido a las formas geométricas de las piezas. La chatarra de conformado en un volumen de 1,5 m³ tiene un peso promedio de 150 a 250 kg en comparación con la chatarra de fundición en un volumen de 1.5 m³ tiene un peso de 450 a 750 kg, la manipulación de la chatarra de conformado lleva más tiempo, pero compactando la misma se tiene una mejor manipulación.

Los tamaños de chatarra de fundición referidos en la tabla 2.2 corresponden a los siguientes volúmenes aproximados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Volumen ocupado por la chatarra de fundición en función del tamaño.

Tamaño	Volumen
Chico	> 0,030 m ³
Mediano	0,030 m ³ a 0.0730 m ³
Grande	< 0.730 m ³

Los tamaños de la chatarra de conformado no se puede medir por un volumen debido a que tienen un menor espesor, pero largos o anchos de gran tamaño, es el caso de los perfiles y las placas. Para los productos de trefilado se clasifican en tres: espesor delgado, ancho pequeño y largo muy grande.

La composición química de las piezas de chatarra de aluminio (tabla 2.2) es variable con respecto al tipo de aleación pero un 80% pertenece a la clase de 300.0.

Tabla 2.2. Tipos de chatarra de consumo frecuente en la planta Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.

Material	Composición Química.							Descripción	
	Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn		
	Rin	A356.0	6,8	0,2	0,02	0,01	0,4	0,01	Proviene moldeo permanente, secciones muy gruesas de aluminio de tamaño mediano a grande.
	Múltiple de admisión	384.0	10,5 - 12,0	1,3	3,0 - 4,5	0,5	0,1	3,0	Proviene de colada a presión, secciones con mucha grasa y polvo, secciones gruesas de aluminio.
	Transmisión	332.0	8,5 - 10,5	1,2	2,0 - 4,0	0,5	1,5	1,0	Proviene de molde permanente, secciones muy gruesas de aluminio, acompañadas con grasa y polvo.
	Cuerpo de válvula de tractor	380.0	8,5 - 9,5	1,0	2,0 - 4,0	0,5	0,3	2,9	Proviene de colada a presión, pieza de gran tamaño con secciones gruesas de aluminio, acompañada de grasa y polvo.

Material		Composición Química							Descripción
		Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	
	Cuerpo de válvula	360.0	9,0-10,0	2,0	0,6	0,35	0,5	0.5	Proviene de colada en arena o molde permanente, pieza de tamaño grande con grasa y polvo en su interior.
	Cabeza de motor	380.0	8,5 - 9,5	1,0	2,0 - 4,0	0,5	0,3	2,9	Proviene de colada a presión, pieza de tamaño medio a grande, acompañado de aros de acero en 5% de su peso, acompañado de grasa y polvo.
	Pistón chico	332.0	8,5 - 10,5	1,2	2,0 - 4,0	0,5	1,5	1,0	Proviene de molde permanente, pieza de tamaño medio, con aros de Fe en su interior en proporción de 5% de su peso, acompañado de grasa y polvo.

Material		Composición Química							Descripción
		Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	
	Base de estéreo	413.0	11,0 - 13,0	2,0	1,0	0,35	0,1	0,5	Pieza de colada a presión de tamaño medio o chica, las secciones son delgadas acompañada de polvo y tonillos de Fe.
	Tapa Carburador de aluminio	319.0	5,5 - 6,5	1,0	2,0 - 4,0	0,5	0,1	1,0	Colada en arena o molde permanente, pieza de tamaño pequeño, secciones delgadas, acompañada de grasa y polvo.
	Carcasa de lámpara	413.0	11,0 - 13,0	2,0	1,0	0,35	0,1	0,5	Pieza de colada a presión de tamaño medio con secciones delgadas acompañado de polvo.

Material	Composición Química							Descripción	
	Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn		
	Suela de plancha	413.0	11,0 – 13,0	2,0	1,0	0,35	0,1	0,5	Pieza de colada a presión, de tamaño chico viene acompañado de acero, plásticos, material refractario.
	Radiador	3011	0,40	0,7	0,05 -0.2	1,2		0,05	Pieza de conformado, pieza con secciones muy delgadas acompañado de polvo y orillas de Fe en proporción de 30% de su peso.
	Litografía	1325	0,65+Fe		0,05	0,05	0,05	0,1	Pieza de conformado de tamaño variado, con secciones delgadas acompañado de pinturas orgánicas muy inflamables.

Material		Composición Química							Descripción	
		Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn		
	Papel aluminio	8079	0,05	0,70 - 1,3	0,05				0,1	Pieza de conformado, de tamaño pequeño de secciones delgadas acompañado de polvo y pintura.
	Platos de comida	3003	0,6	0,7	0,05 - 0,2	1,0 - 1,5			0,1	Pieza de Conformado, de tamaño pequeño y secciones delgadas acompañado con lacas y pintura exotérmicas.
	Perfil	6063	0,2 - 0,6	0,35	0,1	0,1	0,45 - 0,9		0,1	Pieza de extrusión de tamaño variado son secciones muy delgadas acompañado de pinturas exotérmicas.

Material	Composición Química							Descripción
	Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	
 <p>Lamina p/autos</p>	2036	0,5	0,5	2,2 - 3,0	0,1 - 0,4	0,3 - 0,6	0,25	Pieza de conformado de tamaño grande de secciones delgadas con punturas exotérmicas.
 <p>Contramarcos</p>	5657	0,08	0,1	0,1	0,03	0,8 - 1,4	4,5	Pieza de conformado de tamaño chico con secciones delgadas.
 <p>Cable</p>	1035	0,35	0,6	0,10	0,05	0,05	0,1	Pieza de conformado de secciones muy delgadas con recubrimiento de cobre o plásticos.

2.2 Condición de la chatarra

Las condiciones de la chatarra es muy variable, la chatarra puede venir limpia, sucia y con presencia de otros metales, esta condición depende del uso que tuvo. La chatarra se considera limpia cuando la pieza viene libre de suciedad (aceites, pinturas, oxidación, sin otros metales), caso contrario, la chatarra sucia viene acompañada de aceites, polvo, pintura, oxido, plásticos, etc. Frecuentemente todas las chatarras vienen con alguna suciedad en diferentes proporciones.

En la figura 2.3 se muestra un bote de aluminio, este se considera aluminio sucio por la pintura, el producto en su interior que queda remanente o también polvo acumulado en su interior. La pintura de la lata es muy inflamable donde en su adición al horno se quema elevando la temperatura. La cantidad de aceite que puede contener una pieza de chatarra de aluminio hace que el polvo se puede adherir a la pieza aumentando la suciedad. Esto tiene una repercusión si no se aplica una técnica de fusión adecuada, los productos orgánicos se queman aumentando la cantidad de escoria.



Figura 2.3. Bote de aluminio, lámina automotriz y cuerpo de válvula, presentan suciedades comunes en la chatarra como grasas y pinturas.

Las piezas de chatarra más abundante provienen del sector automotriz, debido a la alta demanda en aluminio que hay en todo el mundo. Se emplea para reducir el peso del vehículo, sin la pérdida del rendimiento, la mejora de seguridad y la emisión de gases. El crecimiento en esta demanda se ve reflejado cada año haciendo una tendencia de crecimiento.

Algunas piezas de chatarra de fundición vienen con piezas de acero en tornillos, uniones, discos, etc. donde el contenido de acero en las piezas varía dependiendo de la pieza, las cuales van del 3% a 15% de su peso total de cada pieza.

El rin es una chatarra de alto valor en el mercado por su gran contenido de aluminio en una masa grande y la poca suciedad que lleva, no genera una gran cantidad de escoria dentro del horno. Otro ejemplo es la suela de plancha es como su nombre lo indica el aparato electrodoméstico, viene acompañado de metales como acero y cobre junto con plástico en uniones y refractario en la zona de la resistencia. La proporción que se encuentran es muy variable dependiendo de la marca y modelo. El acero no es recomendable agregarlo en grandes cantidades al horno lo cual puede reducir el rendimiento metálico. En consecuencia del aumento de contenido de Fe en el baño metálico, para bajar los contenidos de Fe en la composición química final se agrega aluminio primario encareciendo el proceso.

El perfil es un aluminio con alto contenido de magnesio, le da la propiedad para que pueda ser extruido en frio junto con el silicio. El perfil, puede traer tratamientos superficiales como: cobrizado, anodizado, lacado, cromado. Este tipo de tratamientos tienen el efecto en el baño de: aumentar el contenido de cobre y aumentar la producción de escoria por combustión de pinturas.

El radiador se puede encontrar acompañado de mucha suciedad de polvo o grasa, o en el mejor caso se encuentra limpio, el radiador tiene filas de láminas delgadas de aluminio por lo que el tratamiento térmico debe de ser minucioso. El radiador puede estar sin suciedades o venir muy sucio, entre cada una de las laminas se tiene polvo, del peso total del radiador el 5% es polvo lo cual al ingresar una tonelada de material, el 10% es de polvo y suciedades, provocando la formación de escoria del baño de aluminio. Este radiador con mucha suciedad se le considera chatarra de aluminio sucio.

La tabla 2.3 se muestra las fuentes de impurezas en algunos tipos de chatarra de aluminio.

Tabla 2.3. Principales fuentes de impurezas en la chatarra de aluminio

Chatarra de Aluminio	Impurezas
Cables	Fe, Zn, Cu y material orgánico
Figuras	Fe, Cu, material orgánico
Litografía	Fe, óxido, tierra
Papel aluminio	Aceites, comida remanente, papel
Chips	Aceite, Fe, Zn, Cu, Si, tinta
Tubos	Fe, tinta, plástico
Radiador	Fe, Sn, Pb, plástico
Chatarra automotriz	Fe, Zn, Sb
Pistón	Fe, Cr, aceite, material orgánico
Suela de plancha	Fe, Cu, plástico, tierra, óxido
Rin	Pb (esporádico)
Perfil	barniz
Bote	Fe, Mg, tinta, barniz

El principal recubrimiento que se emplea en la industria alimentaria es del tipo epoxifenólico. A estos compuestos se adhiere una capa para mejorar la apariencia externa. Las aceites lubricantes dan protección a las piezas metálicas al desgaste y al buen funcionamiento de los componentes automotrices por lo general. Las proporciones de elementos donde la presencia de azufre, plomo, cloro formando gases nocivos para la salud y el medio ambiente.

2.3 Frecuencia de Llegada de la chatarra en la industria

La chatarra de fundición es la más empleada en la empresa, ya que es la base de las aleaciones a fabricar. Con esto se hace una planeación y un balance de las chatarras disponibles. La chatarra de fundición es más frecuente debido a su mayor proporción en el mercado de chatarras. La chatarra de conformado es menos frecuente debido al gran volumen que ocupa en el transporte. La figura 2.4 muestra la frecuencia de los dos tipos de chatarra más comunes.

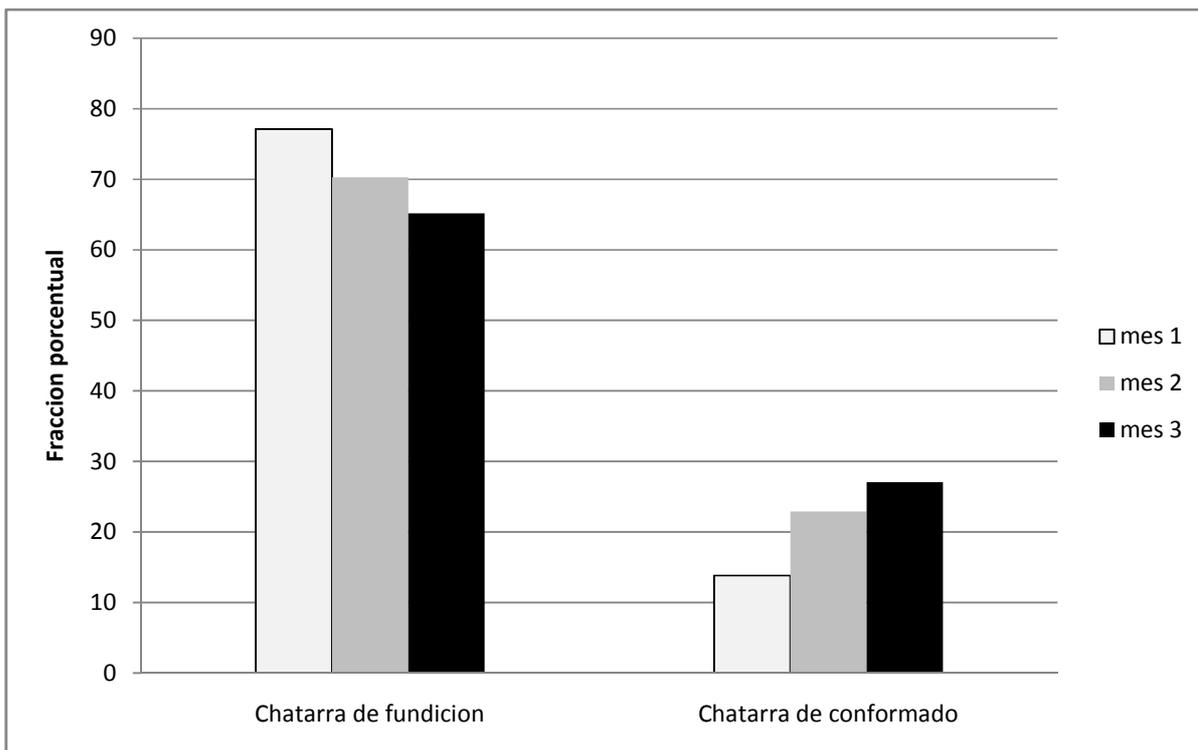


Figura 2.4. Frecuencia en porcentaje de chatarra de fundición y chatarra de conformado.

Las chatarras de aluminio como radiador, rin, perfil, plancha, cable y litografía son menos frecuentes debido a la planeación para la elaboración de una aleación Al9Si3Cu usando en su mayoría aluminio de conformado en un 50% del total.

La chatarra de Fundición como el rin tiene contenidos bajos de Zn y Mn ayudando a la elaboración de la aleación. La suela de plancha es una chatarra de fundición usada para la elaboración de las aleaciones 380.0 y Al9Si3C3 en cantidades muy pequeñas menor al 7% debido a su nivel de impurezas que lleva esta chatarra.

En la Industria es difícil hacer una planeación de las fusiones, debido a que no es constante un tipo de chatarra de aluminio. Esto se puede ver en la figura 2.5, su fracción porcentual de las chatarras principales del total de la chatarra recopilada en un mes.

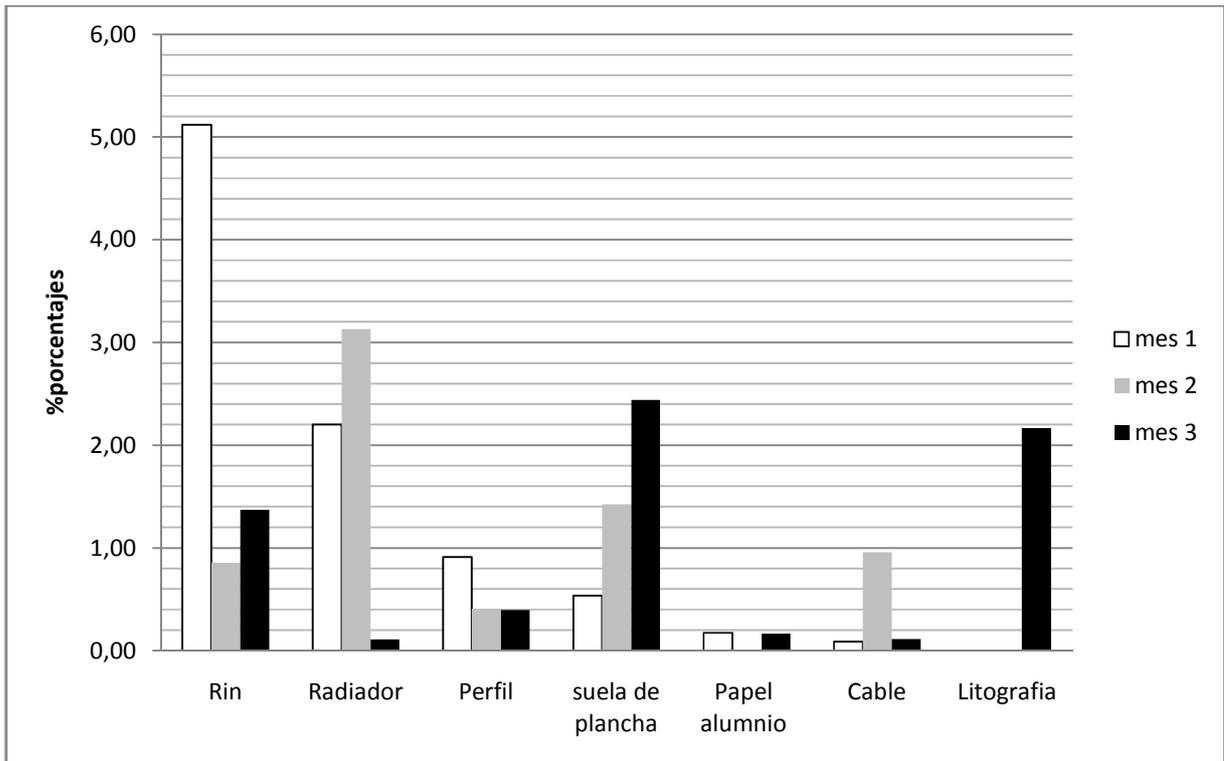


Figura 2.5. Frecuencia en porcentaje de rin, radiador, perfil, suela de plancha, papel aluminio, cable y litografía.

La frecuencia de las chatarras de rin, radiador, perfil, suela de plancha, papel aluminio, cable, litografía son de menor proporción menores de 6% de porcentaje en un lote exclusivo de esta chatarra, estas chatarras pueden venir en un lote de chatarra de fundición o chatarra de conformado incluidas.

Capítulo III.- Protocolo de fusión en Industrial Ligas Metálicas

3.1 Horno de reverbero de Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.

Los hornos de reverbero son hornos de solera de fuego directo utilizados para fundir a determinada temperatura metales no ferrosos. Las aplicaciones del horno de reverbero comprenden la fundición de chatarra, así como la aleación del metal fundido antes de vaciarla en lingotes.

El horno de reverbero de Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.⁵ es de forma cilíndrica horizontal de una capacidad de carga de 7 toneladas. Este cuenta con 2 extremos de alimentación: zona frontal alimentación y zona trasera de “exudado” de aluminio mostrada en la figura 3.1.

La zona de alimentación del horno tiene una cuba de trabajo, donde se ingresa la chatarra clasificada de aluminio.



Figura 3.1. a) Zona de ingreso general de chatarra de aluminio b) zona trasera de exudado de chatarra de aluminio

En la zona frontal del horno de reverbero se carga la chatarra de aluminio (clasificada en la tabla 2.2) para la fusión, este esquema se aprecia en la figura 3.2. En la zona de exudado se ingresan al horno las chatarras con acero mediante una canasta de acero, con el propósito de mantener el acero fuera del baño metálico.

⁵ Horno fabricado por “Tinoco Hermanos” Hornos Industriales y CICSA

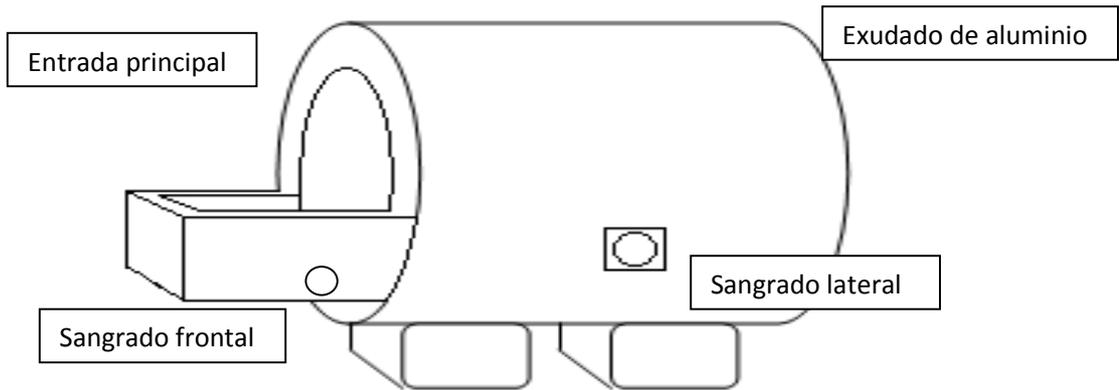


Figura 3.2. Esquema lateral del horno de reverbero basculante.

El horno empleado de industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V., para la fusión de chatarra de aluminio tienen un diámetro exterior de 1.60 m, una longitud de 4.8 m y un espesor de refractario de 24 cm, en la lateral media del horno se encuentra el área de sangrado del horno y en la zona frontal lateral se encuentra el área de drenado del horno.

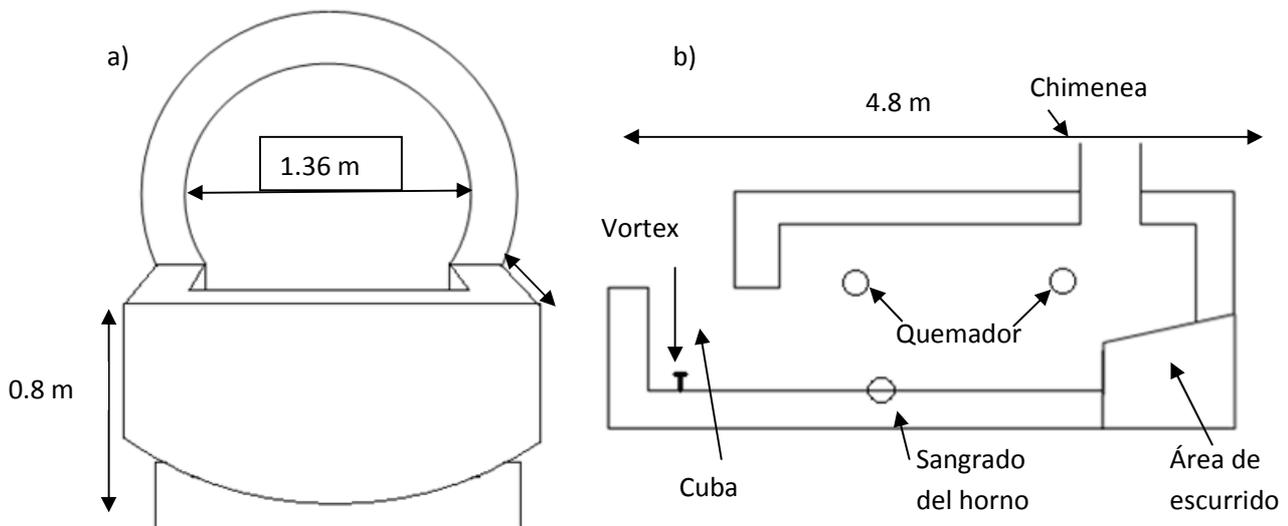


Figura 3.3. a) Esquema frontal del horno reverbero basculante b) Esquema lateral del horno de reverbero basculante

El horno cuenta con un sistema de control de temperatura y movimiento de basculación automatizada para su vaciado total, dirigiendo el metal líquido a un canal de lingoteras automáticas.

En la zona de escurrido se ponen las cargas que contengan alto contenido de material ferroso, evitando el contacto con el baño líquido y su disolución.

3.2 Método actual de fusión en un horno de reverbero*

El horno de reverbero basculante sigue el siguiente procedimiento de fusión, el cual no se generaliza para todos los tipos de chatarra pero actualmente se sigue de acuerdo a la figura 3.4.

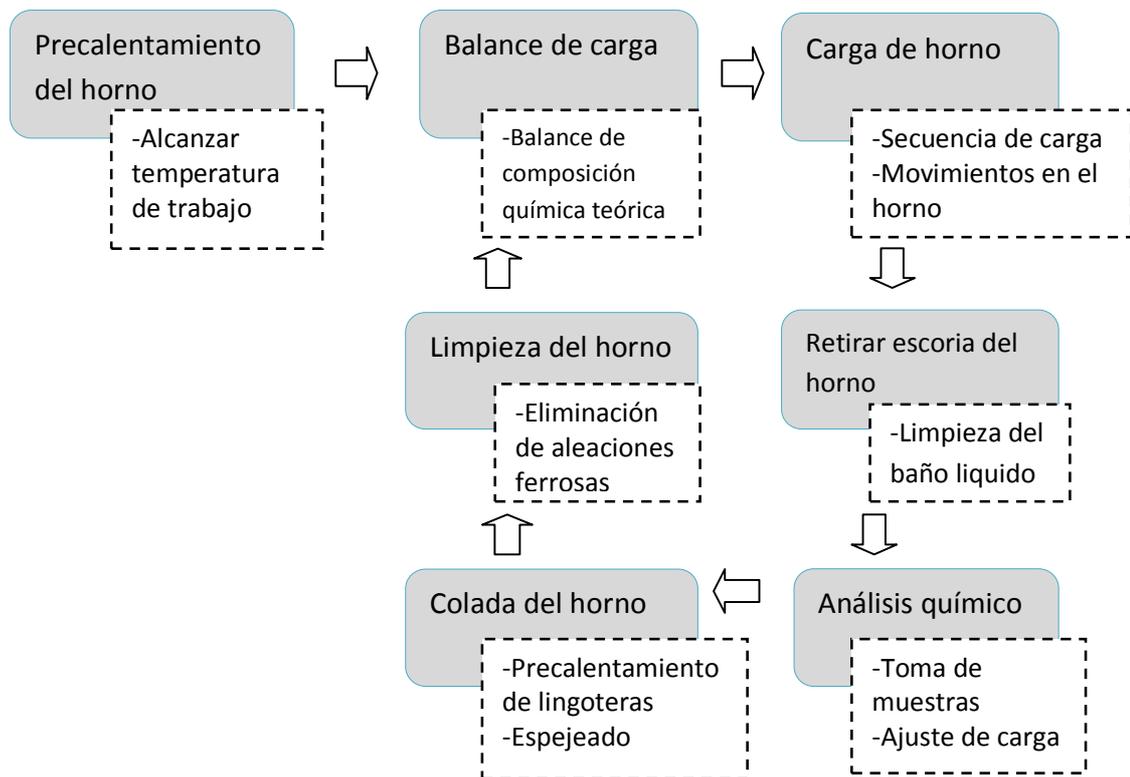


Figura 3.4.- Diagrama de flujo de proceso de fusión del horno de reverbero basculante

3.2.1 Pre calentamiento del horno

El horno se prende con los quemadores al 100% por un tiempo de 30 min completamente cerrado alcanzando la temperatura en el interior de entre 650 a 700°C, para tenerlo a temperatura de carga de chatarra al horno.

Este pre calentamiento tiene el objetivo de tener una temperatura homogénea en todo el horno, evitando las pérdidas de calor a los alrededores con ladrillos refractarios adheridos alrededor del horno de reverbero.

Si no se hace un pre calentamiento del horno se promueve la oxidación del metal en el tiempo que el horno alcanza la temperatura de trabajo usando mas combustible.

3.2.2 Balance de carga

El balance de carga tiene como objetivo fabricar una aleación con la composición química más cercana a lo exacto con el uso mínimo de materiales. La composición química es importante, de esta se obtienen las propiedades que tendrá la pieza.

En Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V. se realizan las siguientes aleaciones de aluminio, mostradas en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Composición química de las aleaciones producidas en Industrial Ligas Metálicas S.A de C.V:

Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
380.0	7.5 -9.5	2.0	3.0-4.0	0.50	0.10	3.0
Al9Si3Cu	9.0-10.9	1.0	2.0-4.0	0.50	0.30	1.2

La chatarra de fundición es una chatarra de composición química no definida, es el conjunto de aleaciones de la familia 3xx.x y 4xx.x. Las aleaciones más comunes son: A356, 384, 380, 319, 413 entre otras. Algunas piezas de fundición pueden tener bajo el zinc como es el caso del rin al ser una A356 tienen los elementos en baja proporción.

La chatarra de fundición que se emplea para la elaboración de una aleación 380.0 no afecta el tener una proporción del 100% en la carga, los elementos críticos están por encima de la composición obtenida teniendo una buena clasificación. Lo contrario ocurre en una aleación Al9Si3Cu, donde los elementos críticos son el Fe, Mg y Zn. Se recomienda agregar hasta un porcentaje de 50% aproximado de chatarra de fundición a 3500 Kg para evitar desviaciones en la composición química.

La chatarra de conformado tiene una composición por lo general de 98% de aluminio, la cual se utiliza para estabilizar o bajar cantidades de Fe. Las familias más frecuentes en la chatarra son la 1xxx, 6xxx, 8xxx, estas familias no afectan mucho la composición química por sus bajas contenidos de elementos. Esta chatarra no puede ser la base de la fabricación de la aleación 380.0 o Al9Si3Cu, debido a su costo final en el ajuste de carga.

En el balance de carga no se considera las suciedades que puede traer la chatarra, la cual en caso de piezas con contenidos de Fe se debe de agregar como un máximo de 500 Kg donde se agregan 75 kg de Fe aumentando hasta 1% de Fe en la aleación.

Algunos balances de carga típicos para la fabricación de la aleación Al9Si3Cu realizados en Industrial Ligas Metálicas se muestran en las tablas 3.2, 3.3 y 3.4.

Tabla 3.2. Balance de carga para una aleación Al9Si3Cu con un total de 6,180Kg.

ELEMENTOS			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
ALEACIÓN :		Al9SiCu3	9.0-10.0	1	2.0-4.0	0.5	0.3	1.2
BALANCE TEÓRICO:			9.07	0.66	2.13	0.17	0.38	1.23
Efectivos Kg	Rendimiento %	Tipo de Chatarra	%	%	%	%	%	%
2,800	90%	chatarra de fundición	7	0.89	2.3	0.3	0.24	2.7
3,100	85%	chatarra de conformado	5	0.5	0.02	0.07	0.55	0.02
210	97%	Si	99.72	0.28				
70	98%	Cu			95			
6,180 total								

Tabla 3.3. Balance de carga para una aleación Al9SiCu3 con un total de 6,220Kg.

ELEMENTOS			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
ALEACIÓN :		Al9SiCu3	9.0-10.0	1	2.0-4.0	0.5	0.3	1.2
BALANCE TEÓRICO:			9.07	0.61	2.13	0.14	0.42	0.88
Efectivos Kg	Rendimiento %	Tipo de Chatarra	%	%	%	%	%	%
2,000	90%	chatarra de fundición	7	0.89	2.3	0.3	0.24	2.7
3,900	85%	chatarra de conformado	5	0.5	0.02	0.07	0.55	0.02
230	97%	Si	99.72	0.28				
90	98%	Cu			95			
6,220 total								

Para la fabricación de una aleación Al9SiCu3 es importante respetar los límites de Zn, Mn y Cu. La característica de estos balances de carga de la aleación Al9SiCu3 es que proporción de chatarra de fundición es menor a la chatarra de conformado observado en la tabla 3.2 y 3.3. En la tabla 3.4 la proporción de chatarra de fundición es mayor a la chatarra de conformado, debido a la chatarra de rin fabricada una aleación A356.0 permitiendo estar dentro de los parámetros de la aleación. El balance de carga típica para la fabricación de una aleación 380.0 en Industrial Ligas Metálicas en las tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.4. Balance de carga para una aleación 380.0 con un total de 6,220Kg.

ELEMENTOS			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
ALEACIÓN :		380	7.0-9.50	2	3.0-4.0	0.5	0.1	3.0
BALANCE TEÓRICO:			8.15	0.88	2.87	0.29	0.24	2.65
Efectivos Kg	Rendimiento %	Tipo de Chatarra	%	%	%	%	%	%
6,100	90%	Chatarra de fundición	7	0.89	2.3	0.3	0.24	2.7
0	85%	Chatarra de conformado	5	0.5	0.02	0.07	0.55	0.02
80	97%	Si	99.72	0.28				
40	98%	Cu			95			
-	99%	Zn		0.05				94
-	95%	Mg					95	
6,220 total								

Tabla 3.5. Balance de carga para una aleación 380.0 con un total de 6,195Kg.

ELEMENTOS			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
ALEACIÓN :		380	7.0-9.50	2	3.0-4.0	0.5	0.1	3.0
BALANCE TEÓRICO:			8.08	0.73	2.4	0.21	0.33	1.66
Efectivos Kg	Rendimiento %	Tipo de Chatarra	%	%	%	%	%	%
3,900	90%	Chatarra de fundición	7	0.89	2.3	0.3	0.24	2.7
2,100	85%	Chatarra de conformado	5	0.5	0.02	0.07	0.55	0.02
135	97%	Si	99.72	0.28				
60	98%	Cu			95			
6,195 total								

Analizando el balance de carga se encuentran 2 errores y son: este balance se hace sin considerar el rendimiento de cada tipo de chatarra y la chatarra de conformado se considera que tiene un porcentaje de 5% de silicio, esto es muy alto para ser una chatarra de conformado mecánico. La familia 4xxx son las aleaciones que pueden tener alto silicio pero en este trabajo no se encontró alguna aleación de conformado perteneciente a esta familia.

La corrección del balance de carga se tratara en el punto 5.5 del Capítulo V.

3.2.3 Carga del horno

La secuencia de carga de la chatarra de aluminio es fundamental para evitar pérdida de metal por oxidación. Se carga la chatarra de conformado al inicio para empezar a tener un baño metálico cuando se ingrese la chatarra de conformado, disminuyendo su oxidación. La chatarra se carga al horno regularmente en la siguiente secuencia figura 3.5

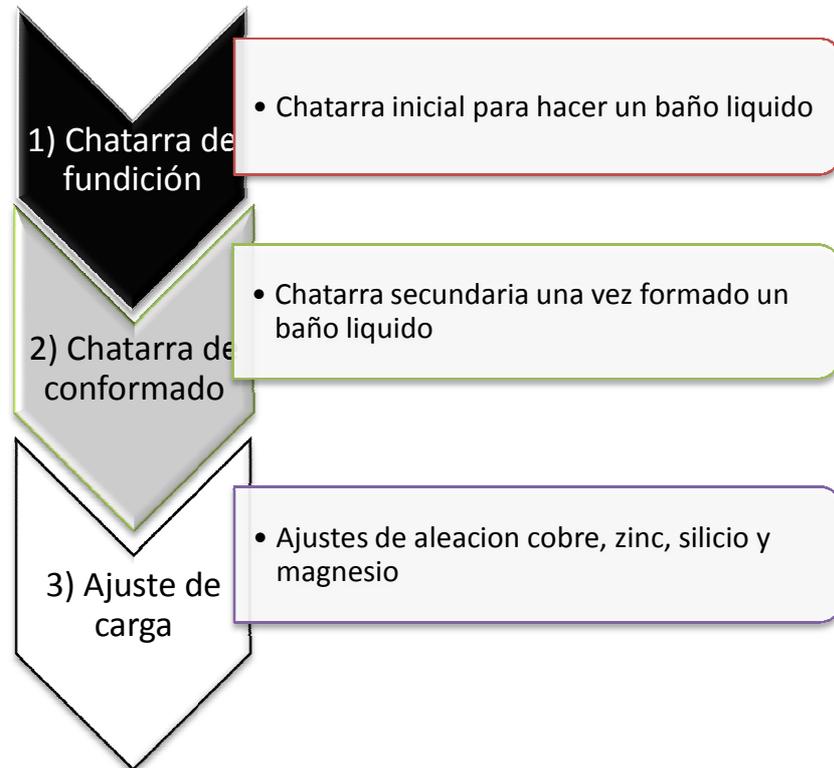


Figura 3.5. Diagrama de flujo de la secuencia de carga, con algunas proporciones que se manejan en la práctica industrial.

La oxidación en el horno de reverbero se debe al contacto directo con las flamas de los quemadores. La chatarra de fundición se oxida menos que la chatarra de conformado esto se explica debido a que la chatarra de fundición en su mayoría son piezas producidas en un proceso de colada a presión, lo cual estas piezas son de secciones gruesas en comparación con el la chatarra de conformado donde proviene de un proceso metalmecánico teniendo secciones muy delgadas y con elevada superficie de contacto.

El horno se carga mediante tolvas con un volumen de 1.57 m³ lo cual en la chatarra de fundición y conformado tienen diferentes kilogramos de ingreso al horno, en la tabla 3.7 y 3.8, se observa la capacidad que tiene con cada una de estas chatarras respectivamente.

Tabla 3.6.- Cantidad de kilogramos por carga del horno de chatarra de fundición

Chatarra de fundición	
Tamaño de piezas de chatarra de fundición	Capacidad por carga por contenedor de 1.5 m ³ (Kg)
grande	450
pequeño	750
mixto	600

Tabla 3.7.- Cantidad de kilogramos por carga de chatarra de conformado

Chatarra de conformado	
Tamaño de chatarra de conformado	Cantidad por carga por contenedor de 1.5m ³ (Kg)
grande	250
pequeño	150
mixto	200

La chatarra de aluminio dependiendo de su clasificación es su forma de ingreso así como los movimientos de agitación del baño, para cada uno de los casos se tiene lo siguiente:

- Radiador: se debe de mantener en constante movimiento, tratando de ingresar al baño instantáneamente, el contacto prolongado a las flamas del horno oxidan las secciones delgadas. El polvo fomenta la generación de la escoria, su mal manejo puede tener un 50% de recuperación del material.
- Perfil: pieza de extrusión de secciones de grueso medio a delgado. Estas secciones deben de agruparse, minimizando su tiempo de introducción al horno. Genera una gran cantidad de escoria por su recubrimiento.
- Chatarra de conformado: este es la combinación de las chatarras antes mencionadas, se debe de tener en constante movimiento mientras se ingresa al horno, para este caso se recomienda una compactación previa.
- Chatarra de fundición: las piezas de mayor tamaño y volumen se ingresan al horno primero, después se agregan las de menor tamaño.
- Rin: esta chatarra se acostumbra ingresar al final de toda fusión ya que es una chatarra que no crea escoria.

Por estas razones el tiempo de llenado de tolvas para la chatarra de conformado es difícil medir, pero al usar la pala mecánica se acelera su recolección.

El tiempo de ingreso de la chatarra al horno es un parámetro que afecta el tiempo contacto del combustible con las piezas y acelera la oxidación, esta se detiene cuando las piezas son sumergidas al baño metálico. En el caso del la chatarra de conformado por tener una mayor superficie de contacto se debe de ingresar más rápido al baño metálico.

3.2.4 Retiro de la escoria del horno

Se retira la escoria de la superficie del baño momentos antes de realizar el análisis químico con los quemadores bajos. Esto se realiza con una pala adaptada a un montacargas. El método consiste en mover el baño para homogenizar su composición, se coloca la pala a una altura donde se puede jalar la escoria poco a poco. La escoria se retira en su totalidad del baño.

3.2.5 Análisis Químico

Se toma una muestra llamada “galleta o moneda”, la cual se analiza por espectrometría de emisión atómica, para verificar la composición química de las aleaciones a realizar. Las composiciones químicas de las aleaciones están en la tabla 3.11.

Tabla 3.8. Especificación de la composición química de aleaciones producidas en Industrial Ligas Metálicas.

Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
380.0	7.5 - 9.5	2.0	3.0-4.0	0.50	0.10	3.0
Al9Si3Cu	9.0 - 10.90	1.0	2.0-4.0	0.50	0.30	1.2

La probeta se analiza para determinar la composición química del baño y así realizar los ajustes necesarios para llegar a la composición química requerida. La prueba se hace de 2 a 3 veces para tener la certeza de composición que se está obteniendo. El tiempo de ajuste puede variar dependiendo de la chatarra ingresada al horno donde el balance de carga realizado al inicio fue una aproximación, para el ajuste se vuelve a hacer otro balance de carga.

Las composiciones químicas predominantes por la cantidad agregada es la chatarra de fundición proveniente de la familia 3xx.x (Al-Si bien con magnesio y cobre) y 4xx.x (Al-Si).

Las especificaciones de las aleaciones realizadas pueden variar, haciendo que se aumente el porcentaje de otros elementos como Fe, Zn, Mn dependiendo a la solicitud del cliente.

3.2.6 Vaciado

Las lingoteras deben de estar pintadas con pintura de grafito lo cual hace que el desmolde sea más rápido. Antes de empezar a vaciar el aluminio se precalientan las lingoteras por medio de quemadores durante 25 min. La temperatura de vaciado es de 610- 620 °C, es medida y verificada con un termopar de inmersión tipo K y el control automático de temperatura del horno.

Capítulo IV. Desarrollo Experimental

4.1 Rendimiento metálico de la chatarra de aluminio experimental

El rendimiento de la chatarra de aluminio no es la misma en todas las cargas y este se ve afectado por: tipo de chatarra, tamaño, condiciones de llegada como oxidación, suciedad y metales diferentes al aluminio.

Se evaluó el rendimiento de la chatarra de aluminio en el horno de reverbero con la siguiente metodología:

El rendimiento es una proporción entre los resultados obtenidos y las cargas de chatarras utilizados.

- El rendimiento fue determinado por balance de materia por elementos.

$$E + G = S + A$$

Donde:

E= cantidad de chatarra ingresada en el horno y el tipo de chatarra

G= generación de materia en el horno por reacciones químicas (formación de escoria, oxidación de aleantes, etc.)

S= cantidad de metal obtenido, con sus subproductos generados por las reacciones químicas.

A= cantidad de materia acumulada en el proceso unitario, se desprecia al ser un proceso unitario se inicia de cero.

- La técnica de fusión para cada proceso unitario tiene variables difícil de controlar por lo que tiene un método estándar, se hacen fusiones y estadísticamente se obtuvo una media de rendimientos experimentales.
- Se plantearon relaciones de chatarras en diferentes proporciones para verificar los datos obtenidos.

Se toman las cantidades del balance de carga del proceso para obtener su rendimiento en cada fusión. En la tabla 4.1 se muestra un ejemplo para obtener el rendimiento.

Tabla 4.1. Cuadro de rendimiento para una fusión típica para obtener la aleación Al9Si3Cu

Entrada		Salida	
Chatarra de fundición Kg	Chatarra de conformado Kg	Metal de salida Kg	Rendimiento %
1100	5430	5132	78

El cálculo para obtención del rendimiento y de las eficiencias particulares de las chatarras es el siguiente:

$$\text{Rendimiento} = \left(\frac{\text{Aleación de aluminio obtenida Kg}}{\text{Chatarra total ingresada Kg}} * 100 \right)$$

Donde:

$$\text{Chatarra total ingresada} = \% \text{Chat fundición} + \% \text{Chat de conformado}$$

La fracción de cada tipo de chatarra en cada carga se determino de acuerdo a lo siguiente:

$$\% \text{ chatarra de fundición} = \frac{1100}{6530} * 100 = 16.84\%$$

$$\% \text{ chatarra de conformado} = \frac{5430}{6530} * 100 = 83.15\%$$

Los rendimientos se separan para cada aleación es decir Al9SiCu3 y 380.0. Se grafica en el eje de la abscisa el % chatarra de fundición y en el eje de la ordenada es el % rendimiento metálico. Con esta información se puede evaluar y hacer una tendencia del rendimiento que hay en cada mezcla en la carga de chatarra, esta información define si este proceso es rentable, e incluso si se puede mejorar.

El rendimiento de una chatarra de aluminio en específico puede afectar el rendimiento global del proceso. Para el estudio de estos rendimientos particulares tiene el propósito una buena planeación del proceso. Los rendimientos de la mezclas de chatarra se debe de comparar con la chatarra que presenta un mejor rendimiento, en este caso es la chatarra de fundición en general.

En la tabla 4.2 se muestra un ejemplo para la obtención de rendimientos de mezclas de chatarras.

Tabla 4.2. Metal recuperado en función de diferentes proporciones de chatarra

No. de prueba	Chatarra de fundición Kg	Chatarra de conformado Kg	Chatarra rin automotriz Kg	Metal recuperado Kg
1	2585	3074	314	4628
2	1335	2584	969	4220
3	843	2804	2375	4987

Teniendo esta información de los pesos de entrada se obtiene el rendimiento de cada uno de ellos.

Rendimiento de cada prueba:

No. de prueba	Rendimiento
1	$\frac{4628 \text{ kg salida}}{5973 \text{ Kg totales}} * 100 = 77.5\%$
2	$\frac{4220 \text{ kg salida}}{4888 \text{ Kg totales}} * 100 = 86.33\%$
3	$\frac{4987 \text{ kg salida}}{6022 \text{ Kg totales}} * 100 = 82.81\%$

Fracción porcentual de cada chatarra:

No. de prueba	Chatarra de fundición (%)	Chatarra de conformado (%)	Chatarra de rin automotriz (%)
1	$\frac{2585}{5973} * 100 = 43.27\%$	$\frac{3074}{5973} * 100 = 51.46\%$	$\frac{314}{5973} * 100 = 5.25\%$
2	$\frac{1335}{4888} * 100 = 27.31\%$	$\frac{2584}{4888} * 100 = 52.86\%$	$\frac{969}{4888} * 100 = 19.82\%$
3	$\frac{843}{6022} * 100 = 13.99\%$	$\frac{2804}{6022} * 100 = 46.56\%$	$\frac{2375}{6022} * 100 = 39.43\%$

En planta se hacen fusiones de 100% de chatarra de fundición mostrada en un balance típico en el capítulo III. Los rendimientos obtenidos de estas fusiones son del orden del 91 al 92% obtenido estadísticamente.

Las comportamientos de las chatarras en los rendimientos se calcularon con una combinación solo de 2 chatarras, chatarra de fundición y otra chatarra representativa, esto se tomo por la técnica empleada en la secuencia de carga al ser la base de todo proceso unitario.

Otras consideraciones tomadas son:

- Se calcularon sin residuos ferrosos,
- Estos comportamientos son basados en cargas promedio de 6200 Kg.
- Los comportamientos de chatarras sucias son reales, las chatarras limpias son extrapolaciones y aproximaciones, debido a que esporádicamente llegan limpias.
- La chatarra de conformado no viene empaquetada.

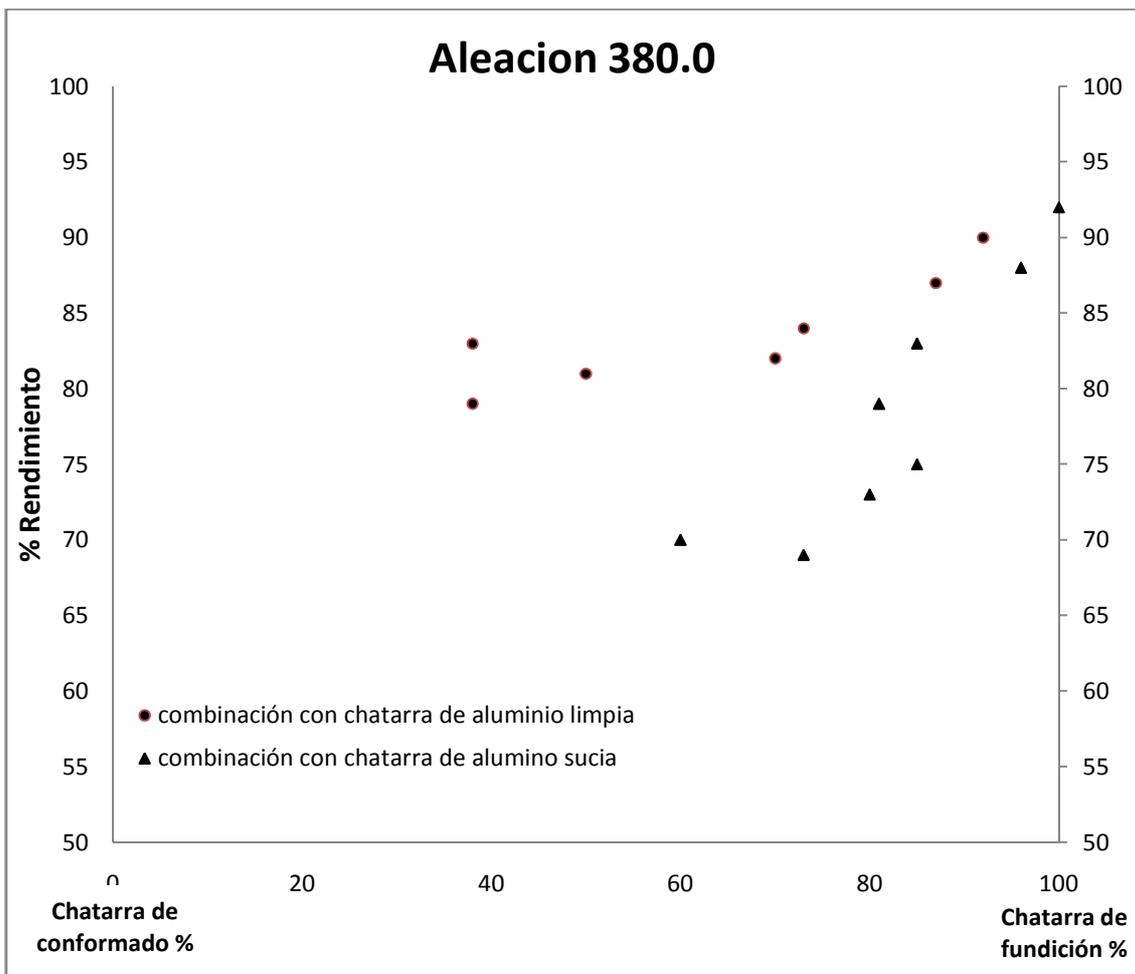
Capitulo V. Rendimiento metálico experimental

Los rendimientos son dependientes de la técnica de trabajo que se utiliza, de los tipos y proporciones de chatarra en la carga. Este es el caso de las aleaciones 380.0 y Al9Si3Cu por las diferentes composiciones químicas,

5.1. Rendimiento metálico para la aleación 380.0

En una aleación 380 los elementos críticos a controlar son el Fe, Mg y Zn, en los que no se debe tener contenidos superiores a los especificados.. En particular esta aleación en un balance de carga controlado puede aceptar una carga de 100% de chatarra de conformado, esto debido a los contenidos amplios de Fe hasta 1.0%, Mg hasta 0.5% y hasta 2.9 % de Zn, que pueden ser tolerados.

Los rendimientos experimentales para la aleación 380.0 tomando en cuenta que su procedimiento en cada % de chatarra de fundición no es la misma, pero con el objetivo de aprovechar los recursos que se tienen, se presentan en las graficas 5.1.



Gráfica 5.1.- Rendimiento de metal con mezclas de chatarras de conformado sucia, chatarra limpia y chatarra de fundición para la aleación 380.0.

En los datos de la grafica 5.1, se puede observar que los rendimientos del metal no es significativamente afectado cuando el % de chatarra de fundición es menor a 70 % para del caso de la combinación con chatarra de aluminio limpia. Lo mismo sucede para el caso del uso de chatarra sucia, solo que en este caso se tiene un efecto significativo sobre el rendimiento cuando la chatarra de fundición es mayor al 70 %. También se observa que la adición de chatarra sucia siempre tiene un menor rendimiento.

Este comportamiento de rendimientos se debe a la oxidación del metal, retención de metal en paredes y en otros metales del interior del horno, metal dentro de la escoria por efecto de la capilaridad. Para esta aleación no se generaron datos de chatarra de fundición en bajas proporciones, debido a que esto no es rentable debido a su alto % Si de modo que al momento del balance final se deben de agregar más elementos aleantes. La tabla 5.1 muestra las pruebas que se hicieron con chatarra de fundición en comparación con las proporciones de la chatarra de conformado, esto se ve reflejado en el rendimiento de la chatarra.

Tabla 5.1. Pruebas experimentales de rendimientos con mezclas con cargas de chatarra de fundición y chatarra limpia de conformado para fabricar aleación 380.0.

No. Prueba	Chatarra de fundición (%)	Chatarra de conformado (%)	Rendimiento (%)
1	92	8	90
2	87	13	87
3	70	30	82
4	50	50	81
5	38*	62*	79*

*La frecuencia de esta proporción no es común pero se toma como un punto de referencia

Observando la tabla 5.1 se ve un aumento del rendimiento metálico al incrementar el % de chatarra de fundición. El rendimiento más bajo se alcanza cuando la carga contiene 38% de chatarra de fundición con un valor de 79% de rendimiento. En la tabla 5.2 se presentan los resultados de las pruebas de chatarra de conformado sucia con la chatarra de fundición sucia.

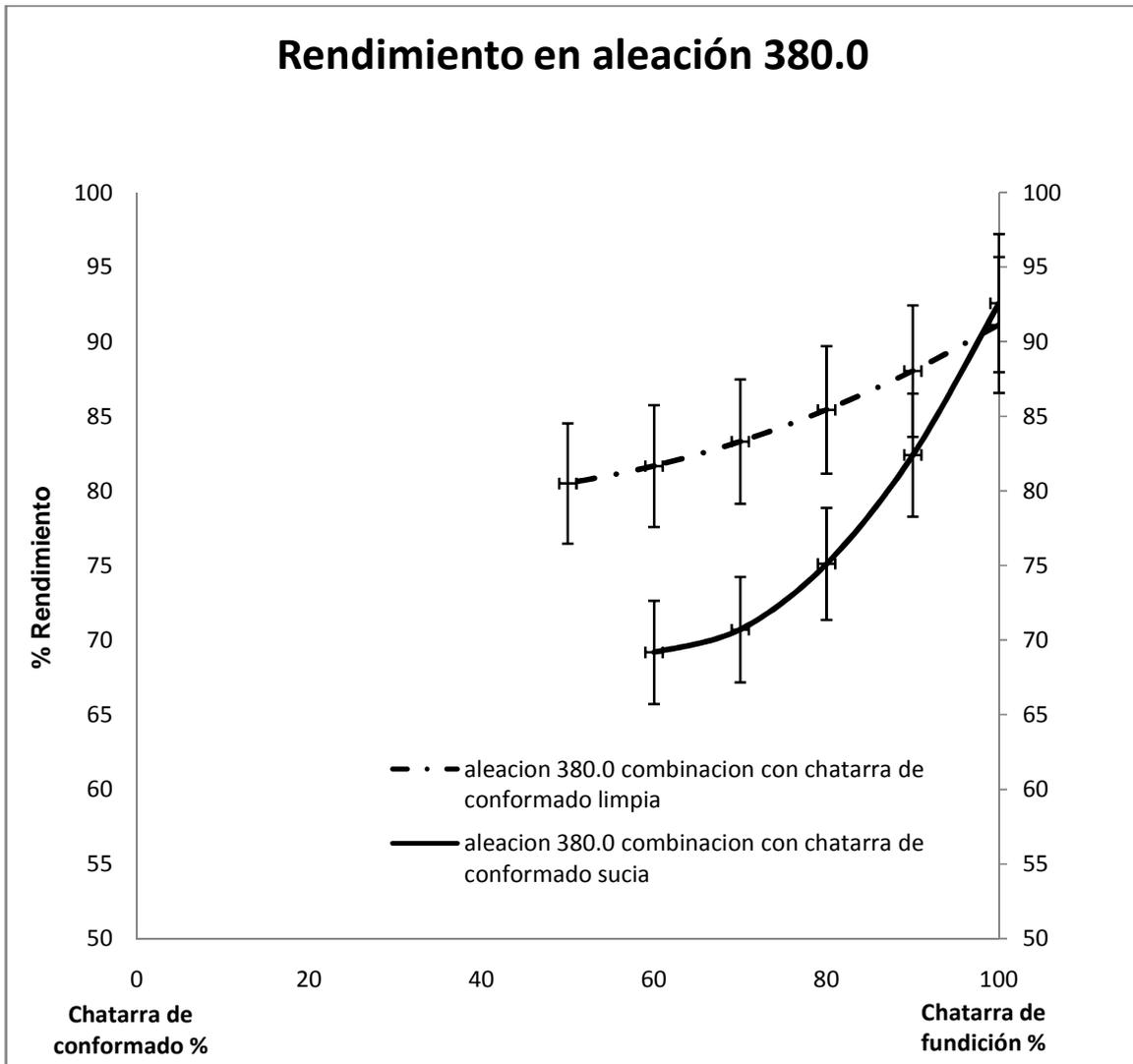
Tabla 5.2. Pruebas experimentales de rendimientos con chatarras de fundición y de conformado sucia para fabricar aleación 380.0.

Prueba	Chatarra de fundición	Chatarra de conformado	Rendimiento metálico
1	100	0	92
2	96	4	88
3	85	15	75
4	60	40	70
5	38*	62*	65*

*La frecuencia de esta proporción no es común pero se toma como un punto de referencia.

La tabla 5.2 muestra rendimientos metálicos menores a los observados en la tabla 5.1. Esta diferencia es debido a la suciedad que lleva la chatarra de conformado pudiendo generar más escoria por la oxidación del metal y mas metal atrapado entre la escoria y el baño liquido. Aunque en la tabla 5.1 y 5.2 el área de contacto es el mismo en algunas mediciones como en el caso de 62% de chatarra de conformado y se obtiene un rendimiento más alto que otro, donde las condiciones de inicio son fundamentales pudiendo o no evitar la pérdida de metal. La tendencia del comportamiento de rendimiento es similar en la tabla 5.1 y 5.2 es decir, con mayores contenidos de chatarra de fundición el rendimiento metálico de aluminio es mayor, esto se asocia a la masividad y poca superficie de la chatarra en comparación con el perfil.

Con estos datos se puede generar una tabla predictiva de comportamientos para la aleación 380.0, tomando en cuenta que para esta aleación un 100% de chatarra de conformado no es rentable debido al comportamiento inadecuado de este material durante la fusión. Los rangos más bajos permisibles de chatarra de fundición en la carga son de 20% a 30%, como se observar en la grafica 5.2.



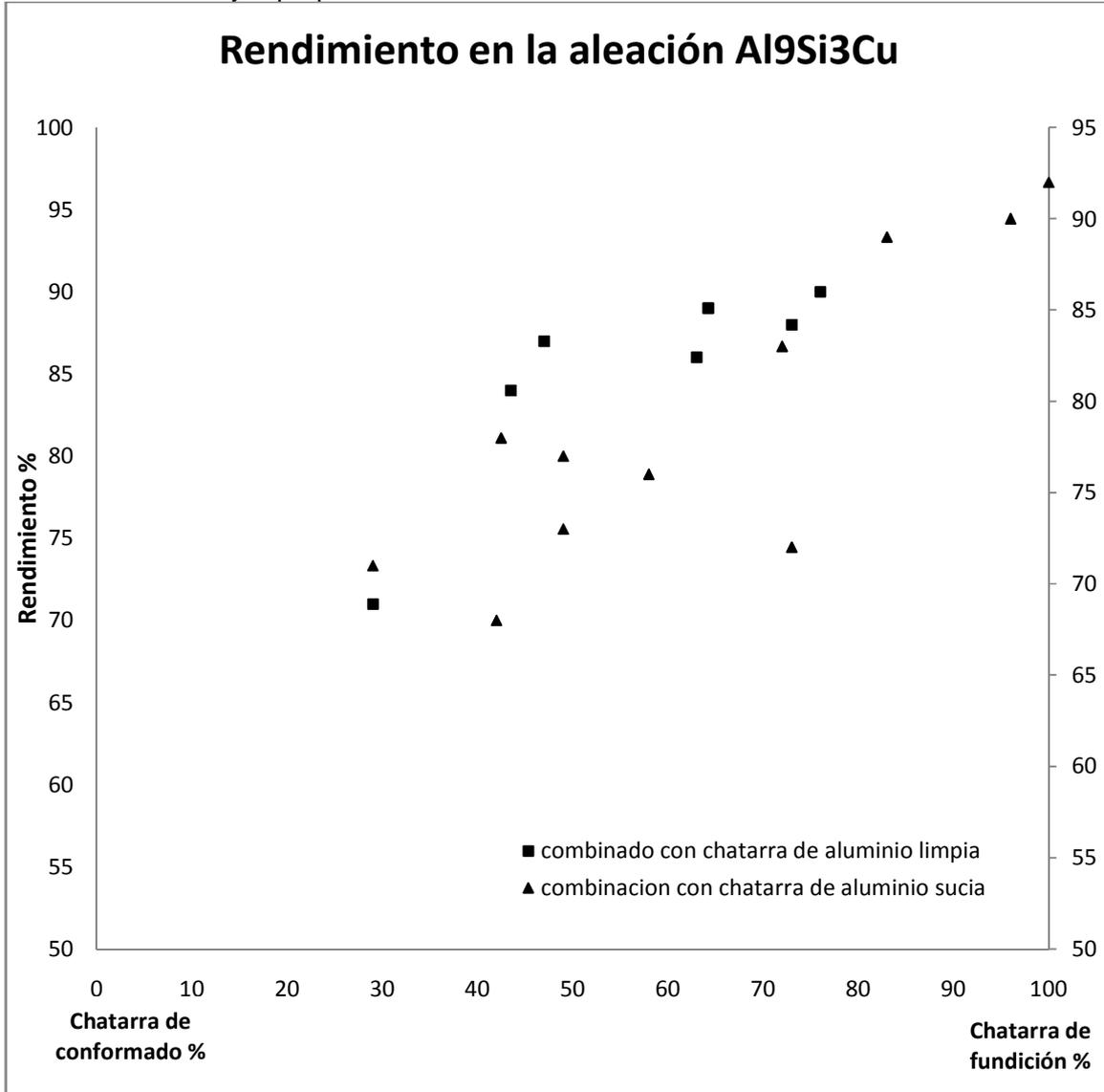
Gráfica 5.2.- Rendimiento de metal con chatarras de conformado sucia, conformado limpia y de fundición para la aleación 380.0, con una variación de $\pm 5\%$.

En la grafica 5.2 se hace una estimación de un comportamiento del rendimiento de la chatarra de fundición hasta valores del 30%. Para la estimación de los valores a proporciones menores del 30 % de chatarra de fundición, se deben tomar en cuenta que no hay un baño metálico de inicio lo que causa muchos problemas para eficientar la fusión de la carga, teniendo como consecuencia el contacto más prolongado con las flamas del horno.

La chatarra de conformado por sus contaminantes externos provoca una pérdida de energía al degradarlos. La pérdida del rendimiento en la chatarra de aluminio depende del tiempo de eliminación de los contaminantes. De la gráfica 5.2, usando el 30% de chatarra de conformado limpia el rendimiento es de un 79% y si se usa sucia se tiene aproximadamente un 63% de rendimiento. Entre ellos hay una diferencia de 16 % en el rendimiento. Si hablamos de una carga de 7 toneladas ese 16% de rendimiento son de 1 120kg de material perdido, lo que indica la importancia de las proporciones y condiciones de cada chatarra en la carga.

5.2. Rendimientos metálicos para la aleación Al9Si3Cu

Para una aleación Al9Si3Cu los elementos críticos Fe, Mn y Zn son parecido a la 380.0, sin embargo el intervalo de Zinc es más estricto para su elaboración, en el balance de carga no se puede incluir una proporción de chatarra de fundición de aleaciones 380 y 316 por su alto contenido de Zn y tener un balance de carga de chatarra de aluminio de conformado en mayor proporción.



Gráfica 5.3.- Rendimiento de metal con chatarras de conformado sucia, conformado limpia y de fundición para la aleación Al9SiCu3.

La tabla 5.3 muestra los resultados experimentales para una aleación Al9SiCu3, para esta se aplica una técnica de fusión diferente dependiendo del balance de carga, pero para poder evitar problemas de composición química final es común el uso de ciertas proporciones de chatarra de conformado. En estas pruebas los contaminantes de la chatarra de conformado son muy pocos o en ocasiones nula, por lo que se considera como limpia.

Tabla 5.3. Pruebas experimentales de rendimientos con chatarras limpias de fundición y de conformado para fabricar aleación Al9Si3Cu.

No. Prueba	Chatarra de fundición (%)	Chatarra de conformado (%)	Rendimiento (%)
1	76	24	90
2	73	27	88
3	64	36	89
4	63	37	86
5	47	53	87

Se puede observar en la tabla 5.3 el rendimiento disminuye a medida que la chatarra de fundición baja en su proporción. Sin embargo la disminución en el rendimiento no es muy significativa, ya que para las cargas ensayadas disminuye de 90% a 87 %, lo que representa solo el 3%.

Para el caso de la tabla 5.4 son las pruebas experimentales para una aleación Al9SiCu3 los contaminantes de la chatarra de conformado es de mucha diversidad considerando que esta es sucia.

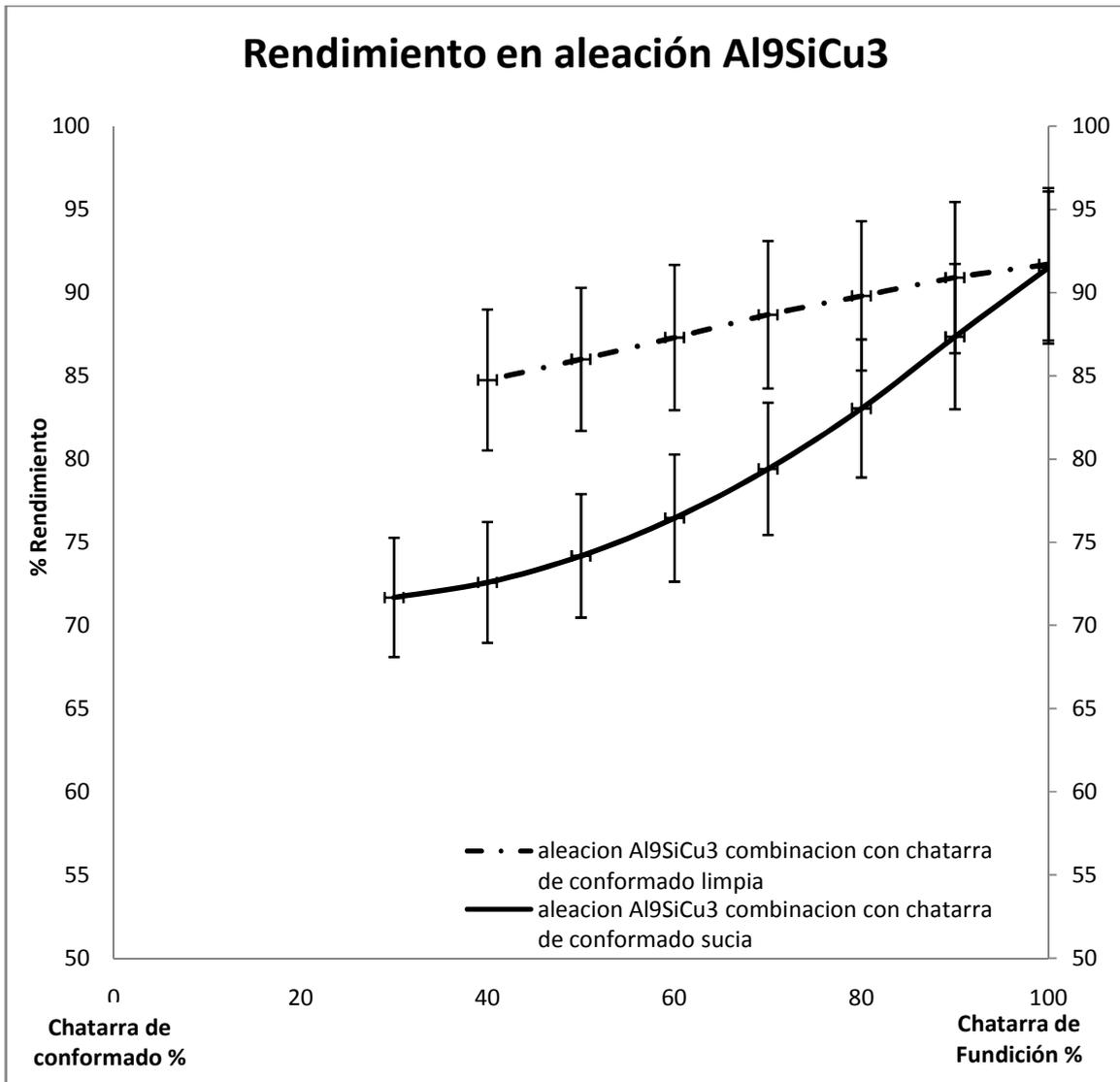
Tabla 5.4. Pruebas experimentales de rendimientos con chatarra de fundición y de conformado sucias para fabricar aleación Al9Si3Cu.

No. Prueba	Chatarra de fundición (%)	Chatarra de conformado (%)	Rendimiento (%)
1	73	27	72
2	58	42	76
3	49	51	73
4	42	58	68
5	29	71	71

Para la aleación Al9Si3Cu con combinación de chatarra de conformado sucia los rendimientos son bajos, debido a la producción de escoria por la combustión de la suciedad y del área de mayor contacto. En esta aleación Al9Si3Cu es más común usar mas chatarra de conformado que en una aleación 380.0. Cuando hay un 23% de chatarra de conformado sucia se obtiene un 73% de rendimiento y cuando él % chatarra

conformado baja el rendimiento. Este es un comportamiento del rendimiento normal ya que en la producción de escoria protege al baño llegando a un máximo de producción.

Usando los datos experimentales obtenidos se construye una grafica predictiva de los rendimientos obtenidos para la aleación Al9Si3Cu. Tomando un 100% de chatarra de fundición con un rendimiento de 91% obtenido experimentalmente y graficando solo hasta datos obtenidos, grafica 5.4.

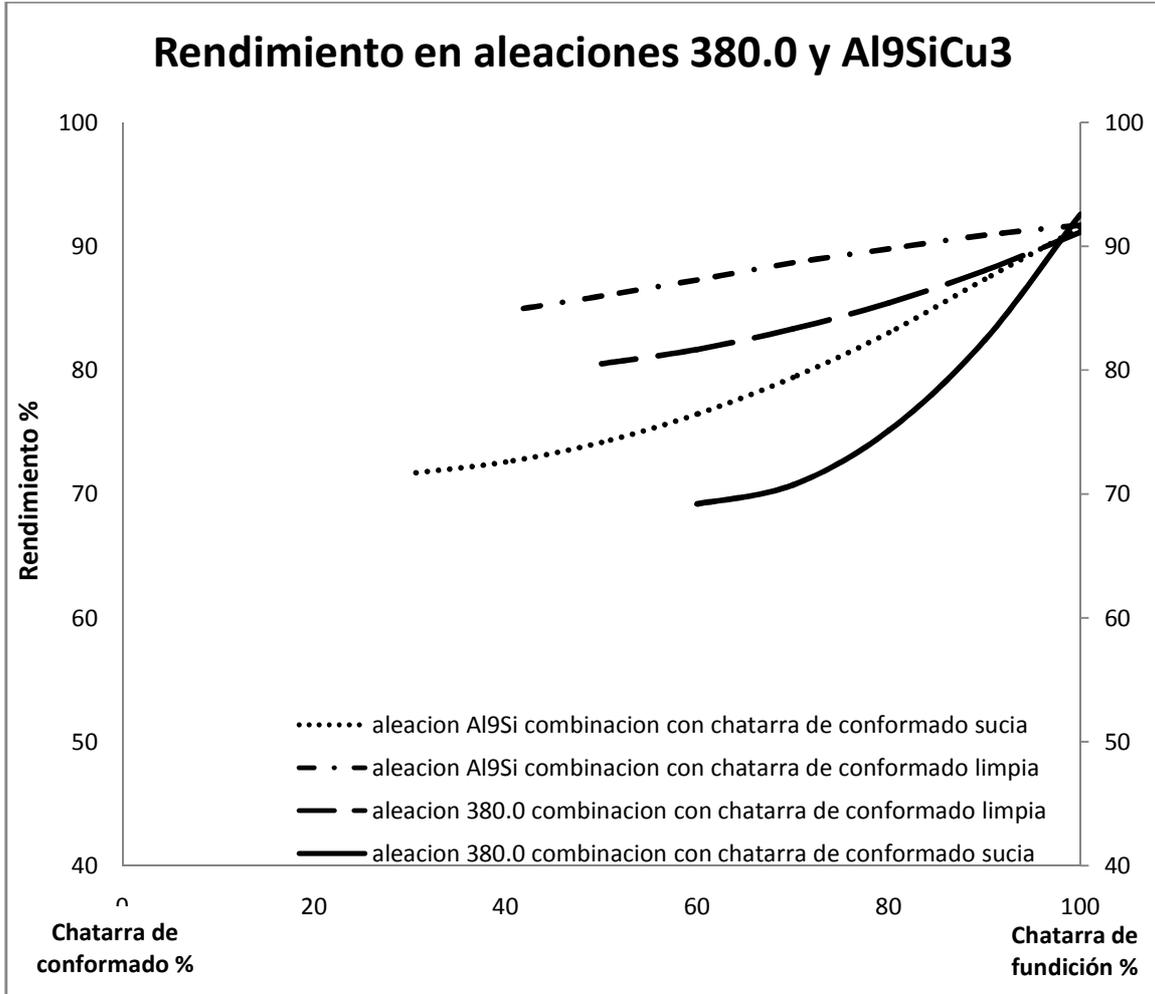


Gráfica 5.4.- Rendimiento de metal con chatarras de conformado sucia, conformado limpia y de fundición para la aleación Al9Si3Cu, con una variación de $\pm 5\%$.

En el proceso de producción de la aleación Al9Si3Cu las chatarras de conformado son más usadas para una aleación 380.0, debido a la composición química demandada por cada una. Su elaboración es difícil cuando se utilizan proporciones mayores de chatarra de conformado sin compactar, ya que se puede presentar oxidación del material por contacto de las flamas del horno y aglomeración de escoria a altas temperaturas.

5.3. Comparación del rendimiento de metal entre las aleaciones 380 y Al9Si3Cu

La gráfica 5.5 muestra comparativamente el comportamiento del rendimiento de metal para ambas aleaciones comerciales 380 y Al9Si3Cu en función de las proporciones y condiciones de la carga de chatarra.



Gráfica 5.5.- Comparación del rendimiento metálico para las dos aleaciones comerciales, utilizando diferentes cantidades y condiciones de chatarra.

En la grafica 5.5 se observa que, en la aleación 380.0 los rendimientos son más bajos que en la aleación Al9Si3Cu, esto es en la mayoría de las fusiones el tiempo de fusión de la aleación 380.0 es menor a la Al9Si3Cu por la composición química menos rigurosa, por otro lado la aleación Al9Si sus rangos estrictos de composición química hacen que la fusión se lleve en más tiempo.

Haciendo una comparación de los rendimientos de estas aleaciones 380 se puede observar que los rendimientos de las chatarras analizadas no varían entre sí. Los rendimientos de la aleación Al9Si3Cu están por arriba de los de la aleación 380.0 debido

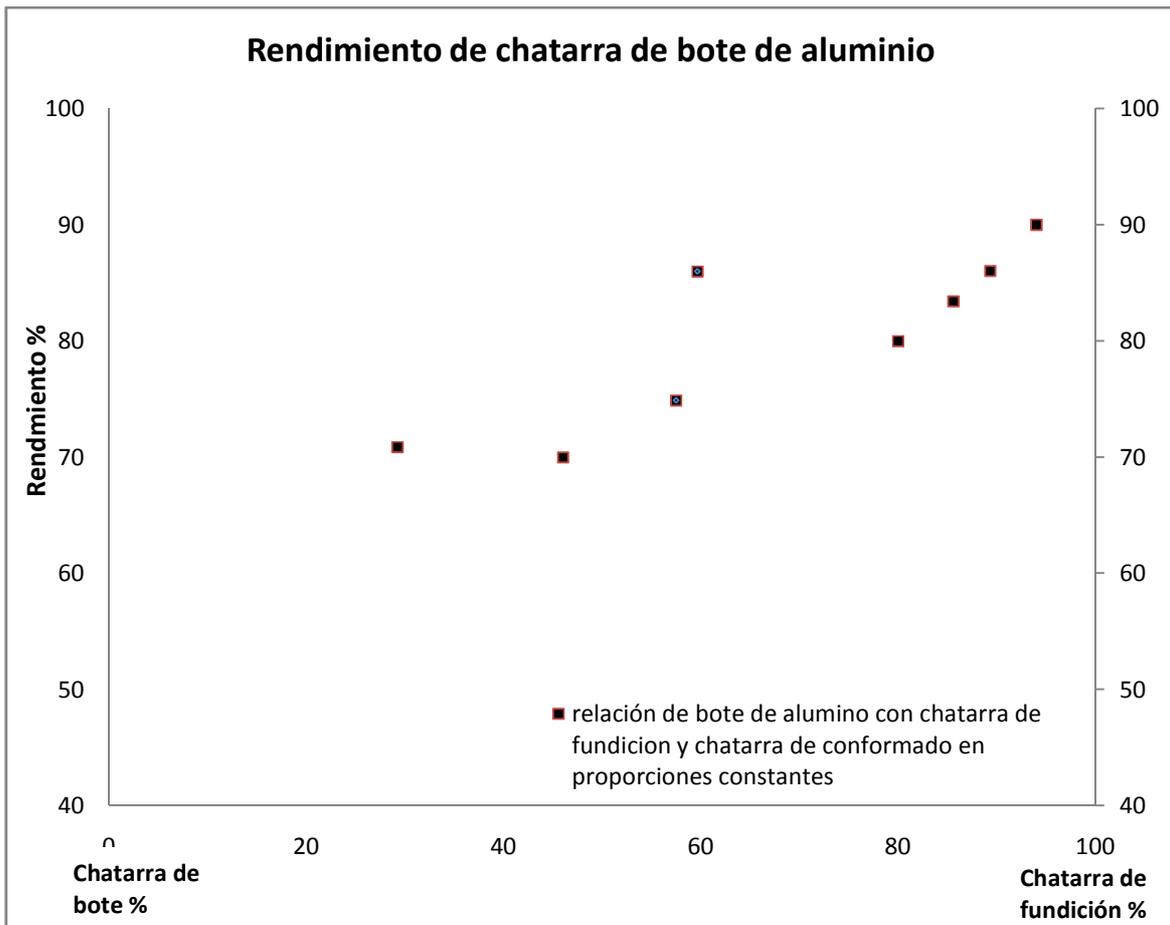
a su proceso de elaboración. Las aleaciones 380.0 y Al9Si3Cu se asemejan sus valores debido a la presencia de contaminantes físicos o el mínimo según sea el caso, el tiempo de fusión se disminuye y se controla mejor el método de fusión.

5.4. Efecto de chatarras particulares en el rendimiento de metal

Debido a que en la planta se reciben lotes de chatarra en grandes cantidades de orígenes bien definidos, estas se utilizan en el proceso para aprovecharlas en la producción de la planta. Por lo que en párrafos siguientes se presentan los resultados de las mismas sobre el rendimiento de metal.

5.4.1. Efecto del bote de aluminio

El bote aleación 1100 por la pintura exotérmica acelerando la formación de la escoria y bajando su rendimiento mostrada en la grafica 5.6, esta chatarra debe de agregarse en cantidades pequeñas evitando la oxidación del baño liquido debido a su difícil manejo en el horno, aun limpio el bote por las secciones delgadas sin compactación es difícil de tratar. Los botes de aluminio tienen un recubrimiento de Ti_2O , en la literatura se manejan las pérdidas de metal liquido por “perdidas por quemado” entre el 8-20% del peso de botes cargadas. En la grafica 5.6 se tienen rendimientos puntuales de bote de aluminio.



Gráfica 5.6. Efecto del rendimiento experimental de la chatarra de bote aluminio.

La chatarra de bote de aluminio es usada comúnmente para aleaciones Al9Si3Cu por su poco aporte de composición química, como la chatarra de conformado. Su uso no es muy frecuente ya que el recubrimiento que llevan hace que la oxidación sea muy rápida. En la tabla 5.5 se muestran algunos porcentajes del bote usados en la carga.

Tabla 5.5. Pruebas experimentales de rendimientos en proporciones de Bote en la elaboración de la aleación Al9Si3Cu.

No. de Prueba	Chatarra de fundición (%)	Chatarra de conformado (%)	Chatarra de bote de aluminio (%)	Rendimiento (%)
1	94	0	6	90
2	89	5	5.6	86
3	85	8.6	5.8	83
4	57	9.5	32.9	75
5	29.2	0	70.75	71

En los resultados se controlaron 2 variables: chatarra de fundición y chatarra de bote de aluminio, la chatarra de conformado se trato de mantener constante o en su defecto en proporciones parecidas. El rendimiento tiende a bajar con una gran pendiente debido a las características de la chatarra de bote de aluminio. El rendimiento se pensaría que baja hasta menos de 50% debido a la oxidación y generación de escoria y al mismo tiempo llegando a unos máximos donde el rendimiento no tiene una baja significativa del valor de 32% a 70% de chatarra de bote de aluminio.

Aunque los niveles de chatarra de conformado se trataron de mantener constantes en niveles de 0% a 10% los rendimientos obtenidos no siguen una secuencia esperada vista en rendimientos de otras chatarras, como consecuencia no se puede tener una estimación adecuada de este tipo de chatarra.

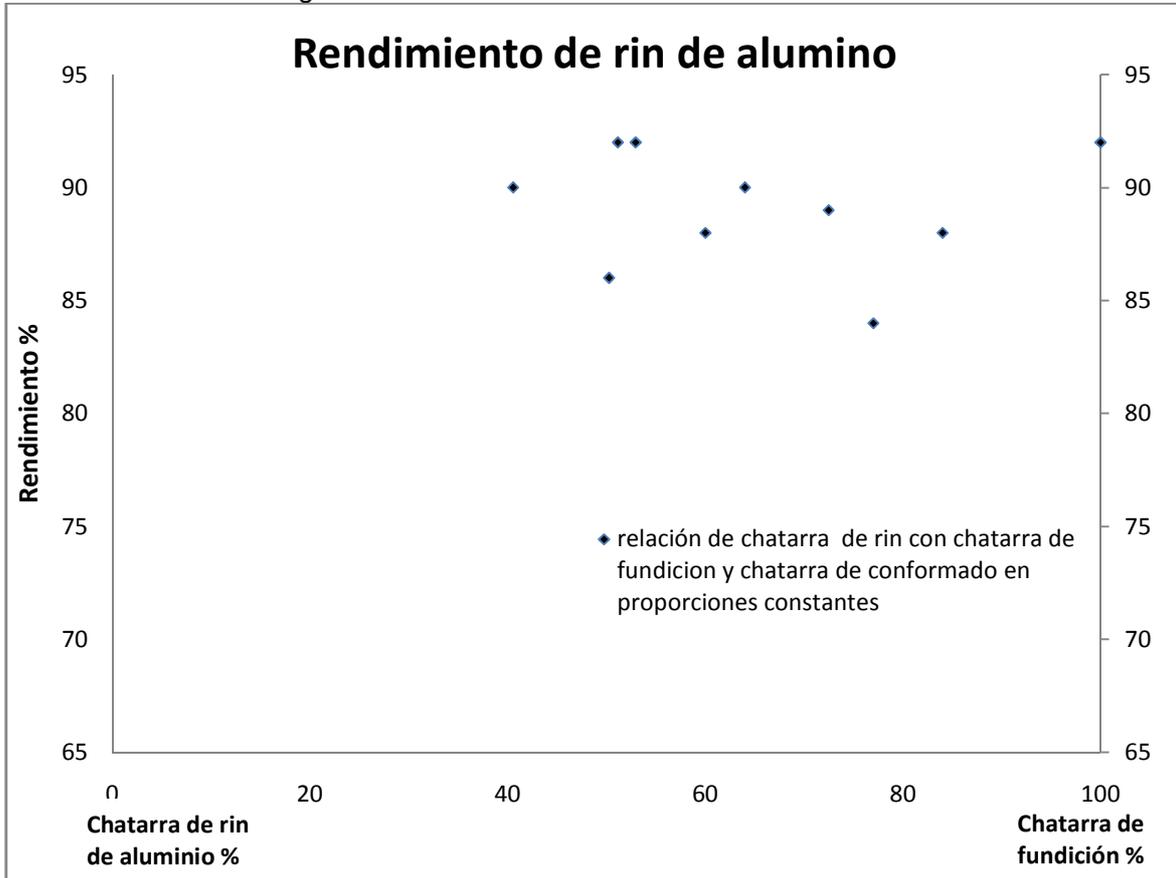
La compactación adecuada del bote es un tema no estudiado en este trabajo. Se hace la estimación con los las pruebas experimentales obtenidas donde para valores menores a 30% de chatarra de bote no se tiene, por que no es un proceso muy rentable. Al ser una chatarra de conformado es difícil de tratar al aumentar la temperatura de trabajo y las reacciones de combustión de la pintura aumenta el tiempo de fusión.

5.4.2. Efecto de rines automotrices.

El rin automotriz es una de las mejores chatarras de fundición para reciclar por su contenido de aluminio, normalmente viene con poca suciedad y agentes extraños, su rendimiento se podría comparar con un lingote de aluminio llegando a rendimientos del 92%. La combinación del rin con chatarra de fundición hace que baje su rendimiento debido a la suciedad que lleva la chatarra de fundición. Idealmente para producir una aleación Al9Si3Cu se recomendaría un 100% de rin pero esto no es rentable debido al

costo de la chatarra. Esta chatarra se puede usar en la producción de aleación 380.0 y Al9Si3Cu donde común mente se usa para la última.

Su aleación 356.0 del rin automotriz hace que sea una chatarra muy importante para reciclaje por sus bajos contenidos elementos a excepción del silicio. Sus rendimientos obtenidos se ven en la grafica 5.7.



Gráfica 5.7. Efecto del rendimiento experimental de la chatarra de rin automotriz.

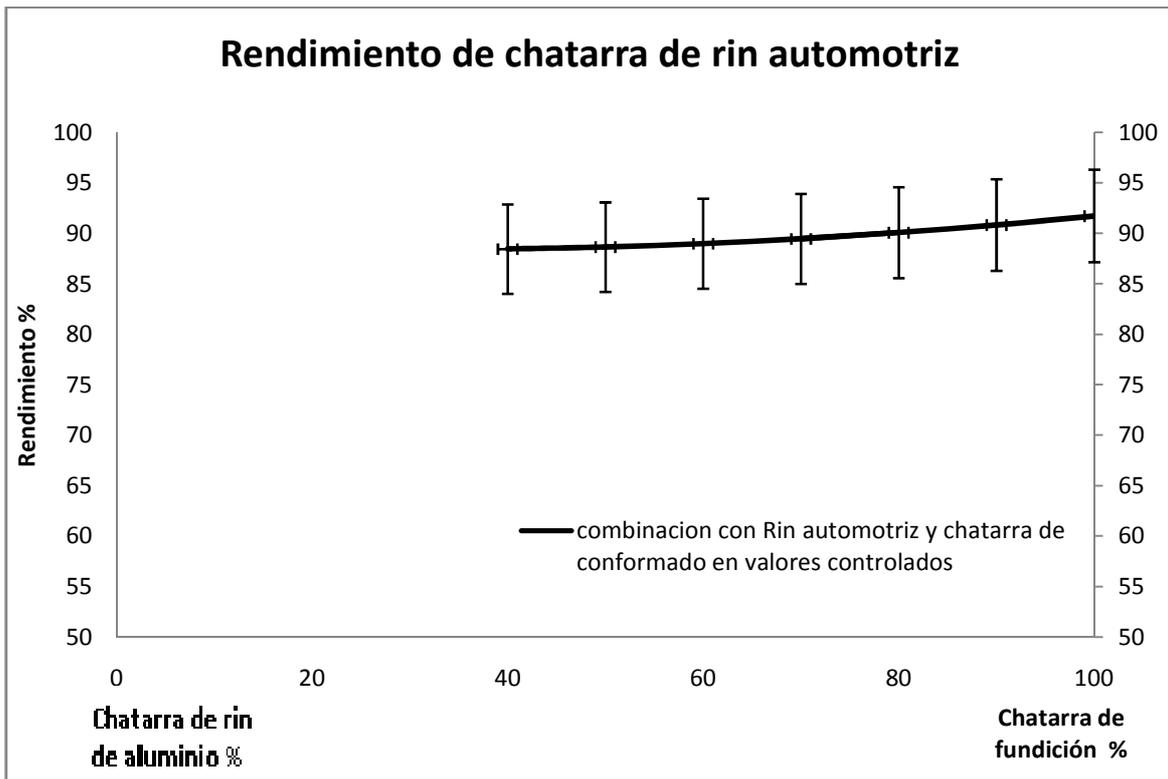
En la grafica 5.7 no se puede apreciar una buena tendencia en la disminución o aumento del rendimiento, solo se puede ver una tendencia a valores bajos de 40% a 50% de chatarra de fundición el rendimiento no baja de 85%. Lo cual es otro motivo por el cual la chatarra de rin automotriz tiene un valor alto en la industria del reciclaje. Las razones de su comportamiento es su masa de aluminio dependiendo del tamaño del mismo.

Algunos rendimientos están más altos o bajos debido a que aunque tiene una gran masa en la circunferencia del centro del mismo puede tener secciones más delgadas debido a su diseño o tipo de rin, lográndose oxidar con el contacto de la flama. Además tiene muy poca suciedad donde se le puede comparar con un rendimiento de lingote. Con la temperatura de trabajo de 630°C a 700°C del horno e sta chatarra se funde muy rápidamente ya que su punto de fusión es más bajo.

En la tabla 5.6 se observan ejemplos de rendimientos de la chatarra de rin en una fusión de una aleación Al9Si3Cu. La chatarra de conformado se mantuvo en rangos de 0% a 20% para considerar los rendimientos y obtener una estimación de los comportamientos de esta chatarra en el proceso mostrada en la grafica 5.8.

Tabla 5.6. Pruebas experimentales de rendimientos en proporciones de rin automotriz.

No. de Prueba	Chatarra de fundición (%)	Chatarra de Rin (%)	Chatarra de conformado (%)	Rendimiento (%)
1	77	13	10	84
2	72	15	12	88
3	53	43	4	92
4	51	21	24	90
5	50	28	22	86
6	45	28	25	72



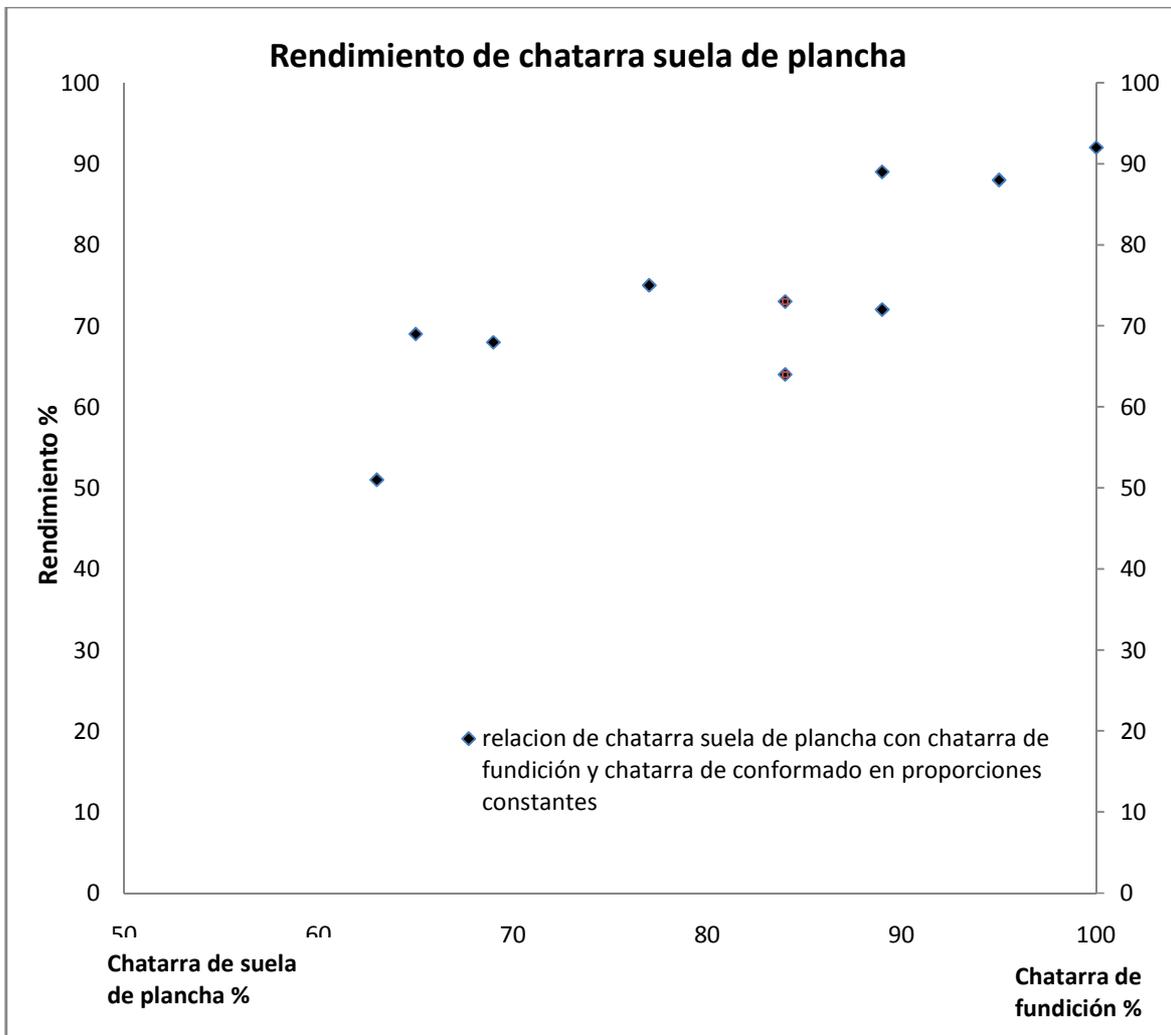
Gráfica 5.8. Estimación del efecto de la chatarra de rin en el rendimiento con una desviación de $\pm 5\%$.

En la grafica 5.8 se muestra una tendencia de bajar su rendimiento de la chatarra de rin. Se puede estimar que teniendo un 40% de chatarra de rin en el baño su rendimiento oscilara en 88 a 90%, teniendo una buena fusión.

No se hace una comparación de Rin en términos de sucio y limpio por que su aplicación antes de ser chatarra no lleva consigo aceites y otro tipo de impurezas. El rin a diferencia de las chatarra de conformado puede manejarse en cualquier proporción donde el puede ser la base de baño metálico o para evitar perdida por oxidación se deberá de agregar al final. Su manejo no es mayor problema al ser piezas de densidad considerable y su fácil manejo dentro del horno.

5.4.3. Efecto de chatarra de suela de plancha

La suela de la plancha se considera una chatarra sucia y contiene muchos agentes no deseados: plástico, piezas ferrosas, las proporciones de estas suciedades siempre aparecen por que son difíciles de limpiar. Cada una de las proporciones de depende del tipo explicado en el capítulo II de este trabajo. Los rendimientos experimentales se muestran en la grafica 5.7.



Gráfica 5.9. Efecto del rendimiento experimental de chatarra de suela de plancha.

Los rendimientos de la chatarra de suela de plancha en intervalos de 100% a 90% no tiene una repercusión manteniéndose en 80% a 89 % en el rendimiento, en intervalos de

90% a 80% de chatarra de suela de plancha decrece en un 80% a 60% de rendimiento y para intervalos de 70% a 60% de chatarra suela de plancha decrece en un 70% a 60% de rendimiento.

La suela de plancha es una chatarra de fundición cuyas piezas tienen un área promedio de 42 cm² y un espesor 0.5 cm en las secciones más delgadas, esto hace que sea una pieza muy pequeña que tienda a oxidarse. Las cargas de suela de plancha se observan en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Pruebas experimentales de rendimientos en proporciones de chatarra de suela de plancha.

No. de prueba	Chatarra de fundición (%)	Chatarra de conformado (%)	Chatarra de suela de plancha (%)	Rendimiento (%)
1	89	0	11	90
2	84	6	10	73
3	84	0	16	64
4	95	2	3	88
5	89	4	7	72

La chatarra suela de plancha se puede encontrar libre de impurezas, como materiales ferrosos, polímeros, refractarios; el rendimiento se aumenta pero su limpieza es muy difícil y poco práctica. El rendimiento que se muestra en la tabla 5.7 las proporciones de suela de plancha es mucho menor que las de chatarra de fundición. Se debe de resaltar que el cambio de los rendimientos es por las condiciones de llegada.

Debido a los rendimientos obtenidos, no siguen un patrón esperado por lo que no se puede hacer una estimación de sus rendimientos. Los porcentajes de chatarra de conformado se mantuvieron en un rango de 0% a 6% pero estos pequeños cambios de la chatarra de conformado tienen una influencia en el rendimiento final de una magnitud significativa.

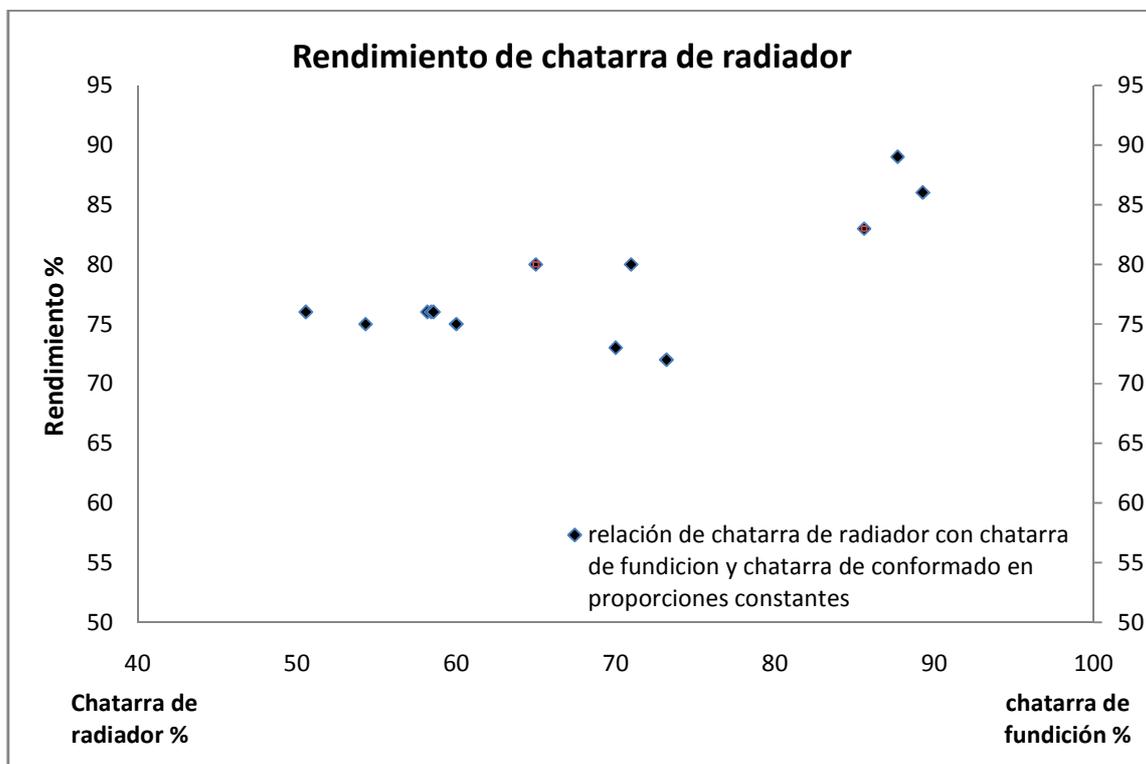
En la prueba 1 y 2 se puede ver una caída en los rendimientos a unos porcentajes bajos de suela de plancha. Para la prueba 3, 4 y 5 se ordenan de menor a mayor proporción de chatarra de conformado, la caída de los rendimientos mostrada en la tabla 5.7 no es de la misma proporción donde no hay chatarra de conformado.

La suela de plancha es una chatarra que puede ser base para el baño metálico al ser una chatarra de fundición. Pero no se recomienda por la cantidad de impurezas físicas que trae. Lo importante a considerar de este tipo de chatarra no es su aportación metálica al baño, sino que debe ser la variación de Fe en la composición química final.

El rendimiento de la suela de plancha va dependiendo de la presentación y el contenido de acero del que viene acompañado, se puede modificar los rendimientos dependiendo del tipo de suela de plancha que llegue.

5.4.4. Efecto de chatarra de radiador

El radiador es una parte automotriz con láminas de ancho pequeño y de espesor delgado con una separación muy delgada entre ellas, pudiendo retener mucha suciedad o con piezas de acero de mayor proporción que el radiador. Su rendimiento experimental se observa en la grafica 5.10.



Gráfica 5.10. Efecto del rendimiento experimental de chatarra de radiador.

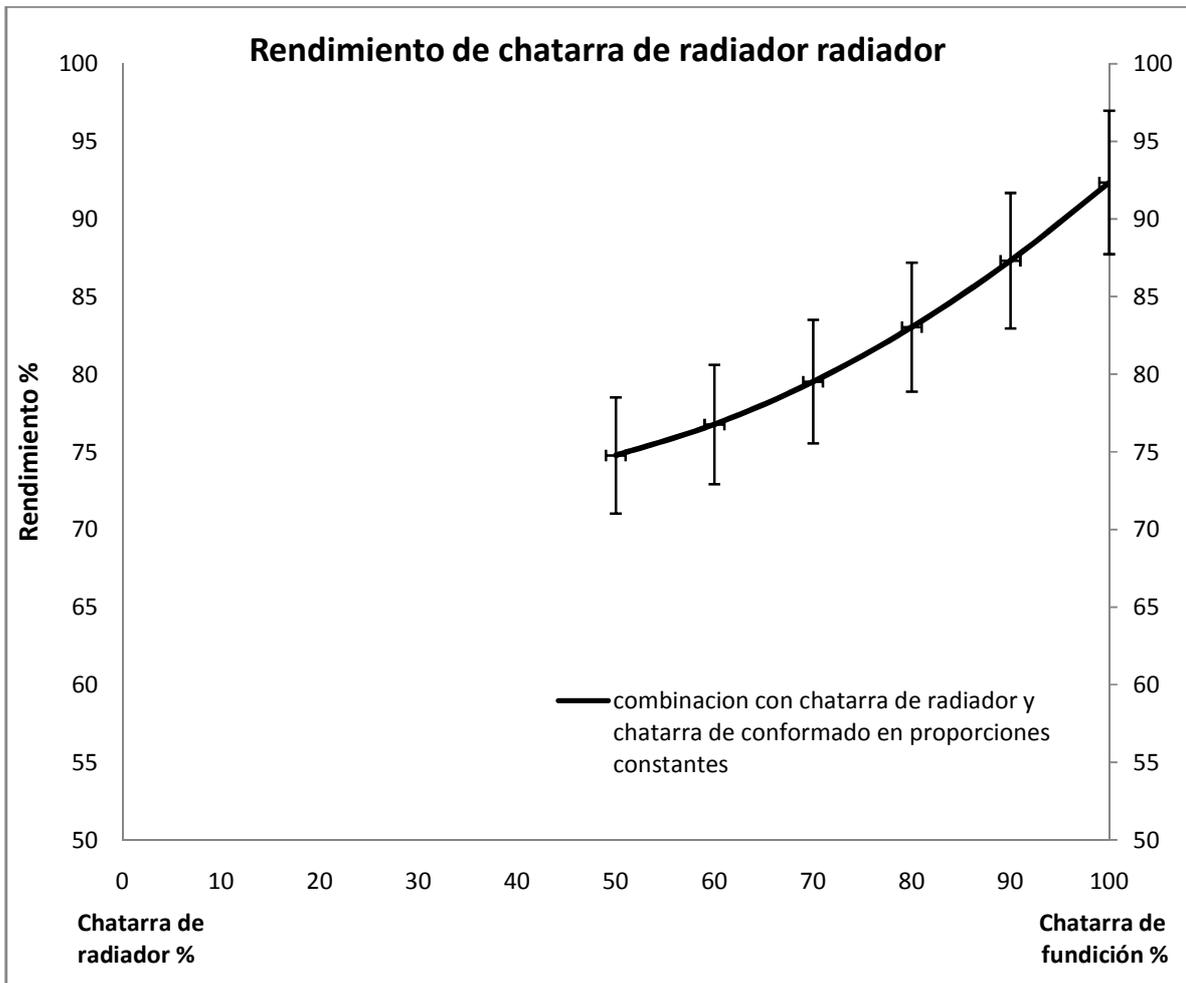
La chatarra de radiador está clasificada dentro de las chatarras de conformado al estar compuesta por laminas y extrusiones de aluminio. En la tabla 5.8 se muestran los rendimientos obtenidos tratando de mantener la chatarra de conformado constante.

Tabla 5.8. Pruebas experimentales de rendimientos en proporciones de chatarra de suela de plancha.

No. de prueba	Chatarra de fundición (%)	Chatarra de conformado (%)	Chatarra de radiador (%)	Rendimiento (%)
1	89	6	5	86
2	73	6	20	72
3	86	6	9	83
4	27	0	73	82
5	88	3	9	89
6	76	4	20	94

Los rendimientos de cada una de estas chatarras depende de su técnica para obtener su máximo rendimiento, esta estimación sirve para tener una referencia de la eficiencia del proceso o de los operadores, no dejando que baje mas de estos rendimientos. Los rendimientos de la prueba 4, 5 y 6 no se pueden comparar por la variación de la chatarra de conformado pero sabiendo el rendimiento de la chatarra de fundición, se pude hacer un ajuste de estimación.

Las combinaciones de más chatarras principales serian estimaciones más exactas pero muy puntuales, es decir, se estudian en rangos al ir agregando una las chatarras, el rendimiento dominante es el que tenga más cantidad en el horno, solo se recomendarían para aleaciones de una máxima calidad.



Gráfica 5.11. Aproximación del rendimiento de chatarra radiador con chatarra de conformado con una varianza de $\pm 5\%$.

5.5 Análisis del balance de carga de Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.

En la tabla 3.2 del capítulo 3, correspondiente al balance de carga que se realiza en Industrial ligas metálicas para producir la aleación Al9Si3Cu se observa que el contenido de silicio en la chatarra de conformado es de 5%. Analizando este contenido de silicio referido a las familias de aleaciones de chatarra provenientes de procesos metalmeccánicos utilizadas en la carga, estas son: 1xxx, 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx y 8xxx. La tabla 5.9 muestra los contenidos típicos del silicio y de algunos otros elementos en estas series de aleaciones. De esta se observa que el contenido de silicio promedio es bajo y del orden de 0.38%, esto indica que la consideración del contenido de silicio del 5 % en el balance de carga realizado por industrial ligas metálicos no es correcto para dichos balances.

Tabla 5.9. Promedio de aleaciones comunes en chatarra de conformado.

	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn
3001	0.4	0.7	0.125	1.2	0	0.05
1325	0.65	0	0.05	0.05	0.05	0.1
8079	0.05	1	0.05	0	0	0.1
3003	0.6	0.7	0.125	1.25	0	0.1
6063	0.4	0.35	0.1	0.1	0.675	0.1
2036	0.5	0.5	2.6	0.25	0.45	0.25
5657	0.08	0.1	0.1	0.03	1.1	4.25
1035	0.35	0.6	0.1	0.05	0.05	0.1
Promedio	0.38	0.49	0.41	0.37	0.29	0.63

Condición que debe ser corregida para obtener un balance de carga adecuado.

Para el análisis del balance realizado en Industrial Ligas Metálicas se hicieron dos balances adicionales.

- a) Balance con y sin rendimiento de chatarras, considerando las composiciones químicas sugeridas por Industrial Ligas Metálicas.
- b) Balance considerando el rendimiento de la chatarra dentro del horno y composiciones químicas sugeridas en la tabla 5.9 (composición promedio de chatarra metalmeccánica).

- a) Balance con y sin rendimiento de chatarras, considerando las composiciones químicas sugeridas por Industrial Ligas Metálicas.

La composición química de la aleación deseada y las chatarras se presenta en la tabla 5.10.

Tabla 5.10. Tabla de materias primas para balance de carga.

Composición química	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn
Aleación Al9Si3Cu deseada	9.5	1	3	0.5	0.3	1.2
Chatarra de fundición	7	0.89	2.3	0.3	0.24	2.7
Chatarra de conformado	5	0.5	0.02	0.07	0.55	0.02
Si para ajuste	99.72	0.28				
Cu para ajuste			95			

La tabla 5.11 muestra los pesos de las chatarras y los elementos de ajuste en la carga total, con esto posteriormente se obtienen las fracciones de cada una de ellas.

Tabla 5.11. Peso total y parcial de materias primas del balance "a"

Chatarras elementos de ajuste	Peso de chatarra Kg
De fundición	2800
De conformado	3100
Si	210
Cu	70
Total	6180

Calculo de la fracción porcentual de cada materia prima (chatarra y material de ajuste).

$$\%Chatarra\ de\ fundicion = \frac{2800Kg}{6180Kg} * 100 = 45.31\%$$

$$\%Chatarra\ de\ conformado = \frac{3100Kg}{6180Kg} * 100 = 50.16\%$$

$$\%Si = \frac{210Kg}{6180Kg} * 100 = 3.40\%$$

$$\%Cu = \frac{70}{6180} * 100 = 1.13\%$$

Cálculo de la cantidad de elementos aportados por las chatarras en una base de 100%.

Chatarra de fundición

$$Si = 45.31Kg \left(\frac{7}{100} \right) = 3.17Kg$$

$$Fe = 45.31Kg \left(\frac{0.89}{100} \right) = 0.40Kg$$

$$Cu = 45.31Kg \left(\frac{2.3}{100} \right) = 1.04Kg$$

$$Mn = 45.31Kg \left(\frac{0.3}{100} \right) = 0.14Kg$$

$$Mg = 45.31Kg \left(\frac{0.24}{100} \right) = 0.11Kg$$

$$Zn = 45.31Kg \left(\frac{2.7}{100} \right) = 1.22Kg$$

Silicio

$$Si = 3.40Kg \left(\frac{99.72}{100} \right) = 3.39Kg$$

$$Fe = 3.40Kg \left(\frac{0.28}{100} \right) = 0.01Kg$$

Chatarra de conformado

$$Si = 50.16Kg \left(\frac{5}{100} \right) = 2.51Kg$$

$$Fe = 50.16Kg \left(\frac{0.5}{100} \right) = 0.25Kg$$

$$Cu = 50.16Kg \left(\frac{0.02}{100} \right) = 0.01Kg$$

$$Mn = 50.16Kg \left(\frac{0.07}{100} \right) = 0.04Kg$$

$$Mg = 50.16Kg \left(\frac{0.55}{100} \right) = 0.28Kg$$

$$Zn = 50.16Kg \left(\frac{0.02}{100} \right) = 0.01Kg$$

Cobre

$$Cu = 1.13Kg \left(\frac{95}{100} \right) = 1.08Kg$$

Con las cantidades de elementos aportados por cada de chatarras se suman para tener el contenido total de cada elemento, esto se observa en la tabla 5.12.

Tabla 5.12. Cantidades de elementos aportados por cada chatarra (Kg) y elementos de ajuste.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Chatarra de fundición	3.17	0.40	1.04	0.14	0.11	1.22
Chatarra de conformado	2.51	0.25	0.01	0.04	0.28	0.01
Si	3.39	0.01				
Cu			1.08			
Balance teórico sin rendimientos	9.07	0.66	2.13	0.17	0.38	1.23

Balance con rendimientos de la chatarra sugeridos por Industrial Ligas Metálicas.

La tabla 5.13 presenta los pesos de cada una de las chatarras y los elementos de aporte en la carga total.

Tabla 5.13. Peso de la carga de cada chatarra y sus rendimientos.

Chatarra y elementos de ajuste	Peso de chatarra, Kg	Rendimiento %
Chatarra de fundición	2800	90
Chatarra de conformado	3100	85
Si	210	97
Cu	70	98
total	6180	

*Este rendimiento es el que utiliza ILM en sus balances preliminares.

Se calcula el rendimiento en el horno de cada chatarra y la fracción porcentual de cada una.

$$\text{Chatarra de fundición} = 2800\text{Kg} * 0.9 = 2520 \text{ Kg} \quad \frac{2520\text{Kg}}{5427.3\text{Kg}} * 100 = 46.43\%$$

$$\text{Chatarra de conformado} = 3100\text{Kg} * 0.85 = 2635 \text{ Kg} \quad \frac{2635\text{Kg}}{5427.3\text{Kg}} * 100 = 48.55\%$$

$$\text{Silicio} = 210\text{Kg} * 0.97 = 203.7 \text{ Kg} \quad \frac{203.7\text{Kg}}{5427.3\text{Kg}} * 100 = 3.75\%$$

$$\text{Cu} = 70\text{Kg} * 0.98 = 68.6 \text{ Kg} \quad \frac{68.6\text{Kg}}{5427.3\text{Kg}} * 100 = 1.26\%$$

$$\text{Total} = 2520 \text{ Kg} + 2635 \text{ Kg} + 203.7 \text{ Kg} + 68.6 \text{ Kg} = 5427.3 \text{ Kg}$$

Se calcula la cantidad de elementos aportados por las materias primas en una base de 100%.

Chatarra de fundición

$$\text{Si} = 40.78\text{Kg} \left(\frac{7}{100}\right) = 2.85\text{Kg}$$

$$\text{Fe} = 40.78\text{Kg} \left(\frac{0.89}{100}\right) = 0.36\text{Kg}$$

$$\text{Cu} = 40.78\text{Kg} \left(\frac{2.3}{100}\right) = 0.94\text{Kg}$$

$$\text{Mn} = 40.78\text{Kg} \left(\frac{0.3}{100}\right) = 0.12\text{Kg}$$

$$\text{Mg} = 40.78\text{Kg} \left(\frac{0.24}{100}\right) = 0.10\text{Kg}$$

$$\text{Zn} = 40.78\text{Kg} \left(\frac{2.7}{100}\right) = 1.10\text{Kg}$$

Chatarra de conformado

$$\text{Si} = 42.64\text{Kg} \left(\frac{5}{100}\right) = 2.13\text{Kg}$$

$$\text{Fe} = 42.64\text{Kg} \left(\frac{0.5}{100}\right) = 0.21\text{Kg}$$

$$\text{Cu} = 42.64\text{Kg} \left(\frac{0.02}{100}\right) = 0.01\text{Kg}$$

$$\text{Mn} = 42.64\text{Kg} \left(\frac{0.07}{100}\right) = 0.03\text{Kg}$$

$$\text{Mg} = 42.64\text{Kg} \left(\frac{0.55}{100}\right) = 0.23\text{Kg}$$

$$\text{Zn} = 42.64\text{Kg} \left(\frac{0.02}{100}\right) = 0.01\text{Kg}$$

Silicio

$$Si = 3.30Kg \left(\frac{99.72}{100} \right) = 3.29Kg$$

Cobre

$$Cu = 1.11Kg \left(\frac{95}{100} \right) = 1.05Kg$$

$$Fe = 3.30Kg \left(\frac{0.28}{100} \right) = 0.01Kg$$

Las cantidades obtenidas son menores al balance del inciso a, debido al rendimiento considerado de cada una de las chatarras, observar la tabla 5.14.

Tabla 5.14. Cantidades de elementos aportados (Kg) considerando el rendimiento de cada chatarra y elementos de aporte.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Chatarra de fundición	2.85	0.36	0.94	0.12	0.10	1.10
Chatarra de conformado	2.13	0.21	0.01	0.03	0.23	0.01
Si	3.29	0.01				
Cu			1.05			
Balance Teórico con rendimientos	8.27	0.59	2.00	0.15	0.33	1.11

La comparación de estos 2 balances se pueden observar en la tabla 5.15. El balance que no considera el rendimiento se acerca más a la composición química deseada, en este caso una aleación Al9Si3Cu. El balance sin considerar los rendimientos de la chatarra no es una buena aproximación.

Tabla 5.15. Comparación de balances teóricos con rendimientos y sin rendimientos.

Elementos aportados (Kg)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Aleación Al9Si3Cu deseada	9.95	1	3	0.5	0.3	1.2
Balance s/rendimientos	9.95	1.00	3.00	0.50	0.30	1.20
Balance con rendimientos	8.27	0.59	2.00	0.15	0.33	1.11

b) Balance de carga considerando rendimientos y composiciones químicas sugeridas en este trabajo.

Este balance de carga considero los valores de 0.38% de Si y 0.41% de Cu de la tabla 5.9 para la chatarra de conformado, con el propósito de corregir el balance en base a las composiciones químicas de las chatarras de conformado.

Para este cálculo se utilizaron los rendimientos promedio obtenidos experimentalmente en función de las mezclas de chatarra utilizadas para producir la aleación Al9Si3Cu, mostrado en la grafica 5.4. Debido a que estos rendimientos dependen de las fracciones de chatarra de fundición y chatarra de conformado se considero para el cálculo un valor promedio.

La tabla 5.16 muestra la composición química de la aleación deseada, de las chatarras y de los elementos de ajuste.

Tabla 5.16. Composiciones químicas de chatarras y elementos de ajuste para balance de carga.

Composición química	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn
Aleación Al9Si3Cu deseada	9.5	1	3	0.5	0.3	1.2
Chatarra de fundición	7	0.89	2.3	0.3	0.24	2.7
Chatarra de conformado	0.38	0.5	0.02	0.07	0.55	0.02
Si	99.72	0.28				
Cu			98			

En la tabla 5.17 muestra las cantidades de chatarras, de elementos de ajuste y sus rendimientos respectivos.

Tabla 5.17. Carga y rendimiento de chatarras para el balance.

Chatarras y elementos de ajuste de carga	Peso de chatarra Kg	Rendimiento %
Chatarra de fundición (Ch1)	2800	85
Chatarra de conformado (Ch2)	3100	85
Si	210	97
Cu	70	98
Total	6180	

Calculo de la fracción de cada uno tomando en cuenta el rendimiento.

$$\text{Chatarra de fundicion} = 2800Kg * 0.85 = 2380 Kg \quad \frac{2380Kg}{6180Kg} * 100 = 38.51\%$$

$$\text{Chatarra de conformado} = 3100Kg * 0.85 = 2635 Kg \quad \frac{2635Kg}{6180Kg} * 100 = 3.30\%$$

$$\text{Silicio} = 210Kg * 0.97 = 203.7 Kg \quad \frac{203.7Kg}{6180Kg} * 100 = 3.85\%$$

$$\text{Cu} = 70Kg * 0.98 = 68.6 Kg \quad \frac{68.6Kg}{6180Kg} * 100 = 1.11\%$$

$$\text{Total} = 2380 Kg + 2635 Kg + 203.7 Kg + 68.6 Kg = 6180 Kg$$

Cálculo de la cantidad de elementos aportados por las chatarras y los elementos de ajuste.

Chatarra de fundición

$$Si = 45.01Kg \left(\frac{7}{100} \right) = 2.66Kg$$

$$Fe = 45.01Kg \left(\frac{0.89}{100} \right) = 0.34Kg$$

$$Cu = 45.01Kg \left(\frac{2.3}{100} \right) = 0.87Kg$$

$$Mn = 45.01Kg \left(\frac{0.3}{100} \right) = 0.11Kg$$

$$Mg = 45.01Kg \left(\frac{0.24}{100} \right) = 0.09Kg$$

$$Zn = 45.01Kg \left(\frac{2.7}{100} \right) = 1.03Kg$$

Silicio

$$Si = 3.30Kg \left(\frac{99.72}{100} \right) = 3.29Kg$$

$$Fe = 3.30Kg \left(\frac{0.28}{100} \right) = 0.01Kg$$

Chatarra de conformado

$$Si = 49.83Kg \left(\frac{0.38}{100} \right) = 0.16Kg$$

$$Fe = 49.83Kg \left(\frac{0.5}{100} \right) = 0.21Kg$$

$$Cu = 49.83Kg \left(\frac{0.02}{100} \right) = 0.01Kg$$

$$Mn = 49.83Kg \left(\frac{0.07}{100} \right) = 0.03Kg$$

$$Mg = 49.83Kg \left(\frac{0.55}{100} \right) = 0.23Kg$$

$$Zn = 49.83Kg \left(\frac{0.02}{100} \right) = 0.01Kg$$

Cobre

$$Cu = 1.11Kg \left(\frac{98}{100} \right) = 1.08Kg$$

Como se puede observar los elementos de aporte son menores al balance del inciso a, debido al bajo silicio de la composición química de la chatarra de conformado y su rendimiento. Estos resultados se presentan en la tabla 5.18.

Tabla 5.18. Cantidades de elementos aportados (Kg) por cada chatarra y elementos de ajuste y balance considerando el rendimiento de cada materia prima del balance "b".

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Chatarra de fundición	2.70	0.34	0.89	0.12	0.09	1.04
chatarra de conformado	0.16	0.21	0.01	0.03	0.23	0.01
Si	3.29	0.01				
Cu			1.10			
Balance de carga con rendimientos	6.14	0.57	1.99	0.15	0.33	1.05

La composición química obtenida con la misma cantidad de chatarras y elementos de ajuste de carga sale por debajo de la composición deseada. La comparación de los balances a (realizado por Industrial Ligas Metálicas) y b (balance sugerido con la corrección de silicio en la chatarra de conformado), ambos considerando el rendimiento de la chatarra se presentan en la tabla 5.19.

Tabla 5.19. Comparación de balances teóricos con rendimientos.

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Aleación Al9Si3Cu deseada	9.0 – 10.9	1	2.0 – 4.0	0.5	0.3	1.2
Balance teórico "a" con rendimientos	8.27	0.59	2.00	0.15	0.33	1.11
Balance teórico "b" con rendimientos	6.14	0.57	1.99	0.15	0.33	1.05

Como era de esperarse, el silicio del balance "b" es bajo a comparación del balance "a" debido al nivel de silicio considerado. Los elementos de Fe, Cu, Mn, Mg y Zn son valores tolerados entre la composición deseada.

Para elevar los valores de silicio se debe hacer lo siguiente:

- a) Cargar chatarras de fundición con un valor elevado de silicio para eso es necesario separar y clasificar las chatarras de fundición cuando se reciben en la planta.
- b) En el caso de no disponer con chatarra de fundición alto en silicio el ajuste se debe de hacer con silicio de ajuste.

Como se aprecia en la tabla 5.20, de acuerdo al balance propuesto se deben de agregar un total de 410 Kg de silicio para alcanzar el porcentaje deseado en la aleación Al9Si3Cu. Las fracciones corregidas de chatarras, elementos de ajuste y la carga total se presentan en la tabla 5.20.

Tabla 5.20. Fracciones de chatarras, elementos de ajuste de acuerdo al balance corregido.

Chatarras y elementos de ajuste de carga	Peso de chatarra Kg	Rendimiento %
Chatarra de fundición (Ch1)	2800	85
Chatarra de conformado (ch2)	3100	85
Si	400	97
Cu	70	98
Total	6370	

Calculo de las fracciones de chatarras y elementos de ajuste, tomando en cuenta el rendimiento.

$$\text{Chatarra de fundicion} = 2800\text{Kg} * 0.85 = 2380 \text{ Kg} \quad \frac{2380\text{Kg}}{6380\text{Kg}} * 100 = 37.30\%$$

$$\text{Chatarra de conformado} = 3100\text{Kg} * 0.85 = 2635 \text{ Kg} \quad \frac{2635\text{Kg}}{6380\text{Kg}} * 100 = 41.30\%$$

$$\text{Silicio} = 410\text{Kg} * 0.97 = 397.7 \text{ Kg} \quad \frac{397.7\text{Kg}}{6380\text{Kg}} * 100 = 6.23\%$$

$$\text{Cu} = 70\text{Kg} * 0.98 = 68.6 \text{ Kg} \quad \frac{68.6\text{Kg}}{6380\text{Kg}} * 100 = 1.08\%$$

$$\text{Total} = 2380 \text{ Kg} + 2635 \text{ Kg} + 203.7 \text{ Kg} + 68.6 \text{ Kg} = 6380 \text{ Kg}$$

Calculo de las fracciones de chatarras y elementos de ajuste la cantidad de elementos aportados.

Chatarra de fundición
 $Si = 37.30\text{Kg} \left(\frac{7}{100}\right) = 2.61\text{Kg}$

Chatarra de conformado
 $Si = 41.30\text{Kg} \left(\frac{0.38}{100}\right) = 0.156\text{Kg}$

$$Fe = 37.30\text{Kg} \left(\frac{0.89}{100}\right) = 0.34\text{Kg}$$

$$Fe = 41.30\text{Kg} \left(\frac{0.5}{100}\right) = 0.206\text{Kg}$$

$$Cu = 37.30\text{Kg} \left(\frac{2.3}{100}\right) = 0.87\text{Kg}$$

$$Cu = 41.30\text{Kg} \left(\frac{0.02}{100}\right) = 0.008\text{Kg}$$

$$Mn = 37.30\text{Kg} \left(\frac{0.3}{100}\right) = 0.11\text{Kg}$$

$$Mn = 41.30\text{Kg} \left(\frac{0.07}{100}\right) = 0.028\text{Kg}$$

$$Mg = 37.30\text{Kg} \left(\frac{0.24}{100}\right) = 0.09\text{Kg}$$

$$Mg = 41.30\text{Kg} \left(\frac{0.55}{100}\right) = 0.227\text{Kg}$$

$$Zn = 37.30Kg \left(\frac{2.7}{100}\right) = 1.03Kg$$

$$Zn = 41.30Kg \left(\frac{0.02}{100}\right) = 0.008Kg$$

Silicio

$$Si = 6.23Kg \left(\frac{99.72}{100}\right) = 6.21Kg$$

Cobre

$$Cu = 1.08Kg \left(\frac{98}{100}\right) = 1.05Kg$$

$$Fe = 6.23Kg \left(\frac{0.28}{100}\right) = 0.017Kg$$

Los elementos aportados por la chatarra y los elementos de ajuste se presentan en la tabla 5.21.

Tabla 5.21. Cantidades de elementos aportados (Kg) por chatarras y elementos de ajuste considerando el rendimiento.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Chatarra de fundición	2.61	0.33	0.86	0.11	0.09	1.01
Chatarra de conformado	0.16	0.21	0.01	0.03	0.23	0.01
Si	6.22	0.02				
Cu			1.06			
Balance con rendimientos	8.98	0.56	1.93	0.14	0.32	1.02

La composición química obtenida por el balance es aceptable ya que entra en los rangos de tolerancia de la aleación Al9Si3Cu. En este caso se deberá hacer una valoración del costo-beneficio en la aleación producida.

Estos balances de carga siguen siendo una aproximación ya que la composición de las chatarras de fundición y chatarras de conformado son mezclas de chatarras. Mientras no se tenga una clasificación más exacta, no se podrá hacer un balance exacto.

Capítulo VI.- Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en la parte experimental de esta tesis, las conclusiones fueron las siguientes:

La chatarra de fundición tiene ventajas de tener un alto aporte metálico, facilidad de manejo antes y durante la fusión. Las desventajas que tiene son controlar la composición química debido a que puede presentar altos contenidos de Fe, Zn y Mg, además viene impregnada con aceites y otros metales que son difíciles de separar, en general una chatarra costosa. El rendimiento máximo que puede tener el horno de reverbero con chatarra de fundición en condiciones óptimas es de 92%.

El uso de chatarra de conformado tiene la ventaja de afectar muy poco el control de la composición química para elaborar la aleación Al9Si3Cu. Es una chatarra barata y por lo general está libre de metales ajenos al aluminio. Sus desventajas son: es difícil su manejo antes y durante la fusión, esta manipulación incrementa el tiempo de carga pero la compactación es una ayuda para su manejo. La chatarra de conformado, tiene más suciedad en forma de productos orgánicos que la chatarra de fundición y mientras que la chatarra de fundición tiene más metales ajenos que la chatarra de conformado.

Al no tener compactación la chatarra de conformado el área de contacto es mayor oxidándolo antes de incorporarse al baño metálico. La chatarra de conformado limpia o con poca suciedad tiene un mayor rendimiento que la chatarra de conformado con mucha suciedad con el método actual utilizado para la fusión. La técnica de fusión se puede cambiar para incrementar el rendimiento pero es necesario elaborar un plan de trabajo al respecto, aspecto que no es parte de esta tesis

El balance de carga es más aproximado considerando los rendimientos de las chatarras y haciendo la corrección de silicio en chatarra de fundición, así como Si, y Cu en la chatarra de conformado.

El análisis de los balances de carga indicó que el silicio apartado por la chatarra de conformado era demasiado alto por lo que se sugirió la corrección del balance en base a un porcentaje de silicio promedio en base a las porcentajes de cargas.

Aleación 380.0

Para la fabricación de la aleación 380.0 partiendo de chatarra de conformado limpia y un control adecuado de la técnica de fusión el rendimiento más bajo alcanzado fue de 80%, mientras que para la chatarra de conformado sucia el rendimiento fue de 64%. En este punto se debe de hacer la relación costo beneficio. Para evitar bajar el rendimiento de 80% en el caso de la aleación 380.0 se debe tener al menos en la carga entre 75% y 85% de chatarra de fundición y el resto de conformado. Solo a excepciones que el balance de carga lo pida se debe modificar esta relación de cargas.

Aleación Al9Si3Cu

En la aleación Al9Si3Cu para tener al menos 80% de rendimiento se deben tener en la carga entre 83% y 89% de chatarra de fundición y el resto de chatarra de conformado. En el caso de la aleación Al9Si3Cu su rendimiento más bajo obtenido con cargas de chatarra de conformado limpia fue del 84%, mientras que con cargas de chatarra de conformado sucia fue de 71%.

Efecto de chatarras complementarias

La chatarra de bote de aluminio por ser una chatarra con elevado contenido orgánico y pinturas inflamables tiene muy poco aporte metálico, por lo que esta chatarra dificulta mantener rendimientos altos cuando se introduce en ciertas proporciones en la carga original.

La chatarra de rin automotriz en la carga produce rendimientos entre el 91 y 88%, esta la convierte en la mejor chatarra para obtener aluminio de reciclado o secundario.

La chatarra de suela de plancha baja el rendimiento de la carga principal, asociado a su tamaño y presencia de suciedad, por lo que la cantidad integrada a la carga principal debe controlarse.

La chatarra de radiador tiene un rendimiento similar a la chatarra de conformado, para mantener rendimientos del orden del 80 % no debe de exceder del 17% de la carga total.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Energía consumida de aluminio secundario en comparación con aluminio primario, excluyendo la energía de transporte.

Figura 1.2. Producción de aluminio primario y secundario global

Figura 1.3. Clasificación por aire Zigzag

Figura 1.4. Separación magnética con auto desmenuzador.

Figura 1.5. Separador por corrientes de Eddy de tipo transportador.

Figura 1.6. Mercado global de chatarras de aluminio, 2007

Figura 1.7. Horno cilíndrico de reverbero basculante.

Figura 1.8. Horno rotatorio.

Figura 2.1. Diagrama de clasificación de chatarra de fundición de acuerdo al proceso de fundición.

Figura 2.2. Diagrama de clasificación de chatarra de conformado de acuerdo a su proceso metalmeccánico

Figura 2.3. Bote de aluminio, lámina automotriz y cuerpo de válvula, presentan suciedades comunes en la chatarra como grasas y pinturas.

Figura 2.4. Frecuencia en porcentaje de chatarra de fundición y chatarra de conformado.

Figura 2.5. Frecuencia en porcentaje de rin, radiador, perfil, suela de plancha, papel aluminio, cable y litografía.

Figura 3.1. a) Zona de ingreso general de chatarra de aluminio b) Zona trasera de exudado de chatarra de aluminio

Figura 3.2. Esquema lateral del horno de reverbero basculante

Figura 3.3. a) Esquema frontal del horno reverbero basculante b) Esquema lateral del horno de reverbero basculante

Figura 3.4.- Diagrama de flujo de proceso de fusión del horno de reverbero basculante

Figura 3.5. Diagrama de flujo de la secuencia de carga, con algunas proporciones que se manejan en la práctica industrial

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Volumen ocupado por la chatarra de fundición en función del tamaño.

Tabla 2.2. Tipos de chatarra de consumo frecuente en la Planta Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.

Tabla 2.3. Principales fuentes de impurezas en la chatarra de aluminio

Tabla 3.1. Aleaciones producidas en Industrial Ligas Metálicas S.A. de C.V.

Tabla 3.2. Balance de carga para una aleación Al9SiCu3 con un total de 6,180 Kg.

Tabla 3.3. Balance de carga para una aleación Al9SiCu3 con un total de 6,220 Kg.

Tabla 3.4. Balance de carga para una aleación 380.0 con un total de 6,220 Kg.

Tabla 3.5. Balance de carga para una aleación 380.0 con un total de 6,195 Kg.

Tabla 3.6.- Cantidad de kilogramos por carga del horno de chatarra de fundición

Tabla 3.7.- Cantidad de kilogramos por carga de chatarra de conformado

Tabla 3.8. Composición química de aleaciones en Industrial Ligas Metálicas

Tabla 4.1. Cuadro de rendimiento para una fusión cotidiana de una aleación Al9Si3Cu

Tabla 4.2. Ejemplo de proporciones de chatarra de aluminio.

Tabla 5.1. Pruebas experimentales de rendimientos con mezclas con cargas de chatarra de fundición y chatarra limpia de conformado para fabricar aleación 380.0.

Tabla 5.2. Pruebas experimentales de rendimientos con chatarras sucias de fundición y de conformado para fabricar aleación 380.0.

Tabla 5.3. Pruebas experimentales de rendimientos con chatarras limpias de fundición y de conformado para fabricar aleación Al9Si3Cu.

Tabla 5.4. Pruebas experimentales de rendimientos con chatarra de fundición y de conformado sucias para fabricar aleación Al9Si3Cu.

Tabla 5.5. Pruebas experimentales de rendimientos en proporciones de Bote en la elaboración de Al9Si3Cu

Tabla 5.6. Pruebas experimentales de rendimientos en proporciones de rin automotriz.

Tabla 5.7. Pruebas experimentales de rendimientos en proporciones de chatarra de suela de plancha.

Tabla 5.8. Pruebas experimentales de rendimientos en proporciones de chatarra de suela de plancha

Tabla 5.9. Promedio de aleaciones comunes en chatarra de conformado.

Tabla 5.10. Tabla de materias primas para balance de carga.

Tabla 5.11. Peso total y parcial de materias primas del balance "a"

Tabla 5.12. Cantidades de elementos aportados por cada chatarra y elementos de ajuste.

Tabla 5.13. Peso de la carga de cada chatarra y sus rendimientos.

Tabla 5.14. Cantidades de elementos aportados considerando el rendimiento de cada chatarra y elementos de aporte.

Tabla 5.15. Comparación de balances teóricos con rendimientos y sin rendimientos.

Tabla 5.16. Composiciones químicas de chatarras y elementos de ajuste para balance de carga.

Tabla 5.17. Carga y rendimiento de chatarras para el balance.

Tabla 5.18. Cantidades de elementos aportados por cada chatarra y elementos de ajuste y balance considerando el rendimiento de cada materia prima del balance "b".

Tabla 5.19. Comparación de balances teóricos con rendimientos.

Tabla 5.20. Fracciones de chatarras, elementos de ajuste de acuerdo al balance corregido.

Tabla 5.21. Cantidades de elementos aportados por chatarras y elementos de ajuste considerando el rendimiento.

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Grafica 5.1.- Rendimiento de metal con mezclas de chatarras de conformado sucia, chatarra limpia y chatarra de fundición para la aleación 380.0.

Gráfica 5.2.- Rendimiento metal con chatarras de conformado sucia, conformado limpia y de fundición para la aleación Al9Si3Cu, con una variación de $\pm 5\%$.

Gráfica 5.3.- Rendimiento metal con chatarras de conformado sucia, conformado limpia y de fundición para la aleación Al9Si3Cu

Gráfica 5.4.- Rendimiento metal con chatarras de conformado sucia, conformado limpia y de fundición para la aleación Al9Si3Cu, con una variación de $\pm 5\%$.

Grafica 5.5.- Comparación del rendimiento metálico para las dos aleaciones comerciales, utilizando diferentes cantidades y condiciones de chatarra.

Grafica 5.6. Efecto del rendimiento experimental de la chatarra de bote aluminio.

Grafica 5.7. Efecto del rendimiento experimental de la chatarra de rin automotriz.

Grafica 5.8. Estimación del efecto de la chatarra de rin en el rendimiento con una desviación de $\pm 5\%$.

Grafica 5.9. Efecto del rendimiento experimental de chatarra de suela de plancha.

Grafica 5.10. Efecto del rendimiento experimental de chatarra de radiador.

Grafica 5.11. Estimación del rendimiento de chatarra radiador con chatarra de conformado con una varianza de $\pm 5\%$.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASM METALS HANDBOOK "Properties and selection: Nonferrous alloys and Special- Purpose materials" edition 2001, Vol. 2 Metals, Park Ohio, 2001.
2. Ponencia IMEDAL "Reciclado de envases y chatarra de aluminio, proceso pre tratamiento, deslacado y fusión a alta temperatura", 2do Congreso de Química 2010.
3. Jonh E. Gruzleski "The tratment of liquid Aluminum-Silicon alloys", The American Foundrymen's Society. U.S.A. 1990.
4. IAI, OEA and EAA, 2006. Aluminum Recycling: The road to high quality products.
www.word-aluminum.org
5. EAA, Facts Sheets (permanently updated).
www.aluminium.org
6. Mark E. Schilesinger "Aluminum recycling" University of Missouri-Rolla, Mo, U.S.A 2007.
7. Friend, W. Earl Jr.; McCormick H, William, et al "Engineering Considerations For the Design of New Aluminum Recycling Facilities", 1986.
8. Roman Moguel, Guillermo J.; Alonso Villanueva, Jose Luis "Aluminio Secundario, procesamiento y expectativas", Moldeo y Fundición, No. 85, año XIV (Febrero 1993); pp. 48-56.

Sitios web:

www.word-aluminum.org

www.aluminium.org

www.oea-alurecycling.org