

Influencia de sales de cloro y flúor en el reciclaje de aluminio por fusión

Ernesto de la Torre, Alicia Guevara y Santiago Yépez

Departamento de Metalurgia Extractiva, (DEMEX)

ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Resumen

El objetivo de este trabajo fue la recuperación de aluminio metálico a partir de residuos industriales y electrónicos mediante fusión en presencia de sales fundentes. Los materiales empleados fueron escorias, limallas y disipadores de calor de computadoras. La caracterización de estos materiales se realizó por medio de espectrofotometría de absorción (AA), sin embargo, la escoria de aluminio, debido a su complejidad, también se analizó por difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB-EDX).

Varios cloruros se probaron para los ensayos de fundición. Se estudiaron los efectos de la composición y cantidad de la mezcla fundente, el tiempo de fundición y la temperatura, sobre la recuperación de aluminio metálico en cada material. Se obtuvieron recuperaciones de aluminio metálico, empleando NaCl y KCl, cercanas al 90 % para los disipadores de calor y las limallas, sin embargo, la recuperación para la escoria fue de un 70 %, ya que existe una capa superficial de óxidos ($MgO \cdot Al_2O_3$) que atrapa al metal. Se estudió el efecto de la adición de fluoruros, KF, NaF y CaF_2 , cada sal se añadió a la mezcla fundente de NaCl y KCl. Se determinó que la recuperación de aluminio, disminuye al aumentar la concentración de fluoruros.

Palabras claves: Aluminio, reciclaje, producción secundaria, fusión, fundición, sales fundentes, cloruros, cloruro de potasio, cloruro de sodio, fluoruros, fluoruro de sodio.

Abstract

The purpose of this work was to recover aluminum from industrial and electronic wastes through a melting process with different salt flux. The materials used in this investigation were aluminum dross, aluminum swarf and heat sinks from discarded computers. A characterization of these wastes was made using atomic absorption spectrophotometry (AA); moreover the aluminum dross was also analyzed through X-ray diffraction (DRX) and scanning electron microscopy (MEB-EDX) due to its complexity.

Several chlorides were used to melt aluminum wastes. The effects of the flux composition, the amount of salt flux, melting time and temperature on aluminum yield were studied for each material. The aluminum yield for melting process using a salt flux based in NaCl and KCl mixtures was approximately 90 % for heat sinks and aluminum swarf. However, only 70 % of the aluminum was recovered from the metal dross, due to the presence of a superficial oxide layer ($MgO \cdot Al_2O_3$) that traps this metal. The effect of fluorides addition was also studied using KF, NaF and CaF_2 ; each salt was added to the NaCl and KCl system. It was shown that aluminum yield for all materials decreased with higher amount of fluoride addition.

Keywords: Aluminum, recycling, secondary production, melting, salt flux, chlorides, potassium chloride, sodium chloride, fluorides, sodium fluoride.

1 Introducción

En el consumo mundial de metales, el aluminio ocupa el segundo lugar, precedido a considerable distancia del hierro y seguido de cerca por el cobre [2]. La producción primaria de aluminio se caracteriza por el alto consumo energético. Se estima que para producir una tonelada métrica de aluminio, se requiere dos toneladas de alúmina, que se obtienen a partir de cuatro toneladas de bauxita [4].

En la etapa de refinación de alúmina, los mayores

consumos energéticos se encuentran en la calcinación del proceso Bayer, donde se estima que, a nivel industrial, se requiere 3750 kWh por cada tonelada de alúmina.

Por otra parte, la refinación electrolítica es el procedimiento más energo-intensivo en la industria del aluminio, ya que el proceso Hall-Héroult trabaja en base a energía eléctrica y el consumo promedio a nivel industrial es de 15364 kWh por tonelada de aluminio.

Adicionalmente, en este último proceso, se liberan gases contaminantes al ambiente debido a la descomposición de fluoruros [4].

1.1 Producción secundaria de aluminio

Uno de los metales más importantes dentro de la industria del reciclaje es el aluminio, puesto que sus desechos tienen un valor económico en el mercado, ya que se considera que la energía, requerida para el proceso de producción primaria, está contenida en el metal en sí, consecuentemente, en la escoria también. De esta forma, se establece que la energía demandada para fundir este último material es tan solo un 5 % de la energía total requerida para la producción primaria de aluminio. Además, este elemento tiene la ventaja de que su estructura atómica no es alterada durante el proceso de fundición, por lo que es posible reciclarlo por completo sin que exista pérdida de calidad o de valor económico [1].

1.2 Fundición de residuos de aluminio

Los residuos de aluminio primeramente se someten a un proceso de clasificación, luego pasan a procesos de trituración y molienda, separación magnética y remoción de impurezas, y por último se somete a estos materiales a una fundición. Los hornos empleados funden diversos tipos de desechos, con el fin de recuperar este elemento. En este proceso, se funde el aluminio a 660 °C, de modo que se obtiene una colada, a la cual se suele añadir lingotes de aluminio puro para mejorar la calidad del producto y cumplir con las especificaciones del mercado. Adicionalmente, se suelen adicionar sales al baño del metal para mejorar la fluidez del metal, de modo que no es necesario elevar la temperatura del horno, y consecuentemente, se minimiza la oxidación del material. La única desventaja de la adición de sales, es el hecho de que se producen emisiones gaseosas contaminantes al ambiente [3].

Las sales fundentes, que se utilizan durante la fundición de desechos de aluminio, están compuestas de cloruros y de fluoruros. Además, se suelen añadir otras sales con el fin de dar propiedades específicas a la mezcla

de sales. El sistema binario más empleado en el reciclaje del aluminio es la mezcla de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl). El cloruro de sodio presenta un punto de fusión de 802 °C, mientras que el cloruro de potasio se funde a 775 °C. Al realizar una mezcla 49,3 % molar de KCl y 50,7 % molar de NaCl de estas sales, se forma un punto eutéctico de 667 °C. Es así que, las mezclas equimolares son muy empleadas en el reciclaje de aluminio, puesto que presentan un valor de temperatura de fusión muy cercano al punto eutéctico [6].

Los cloruros son muy importantes en la recuperación de aluminio ya que evitan la oxidación del metal, sin embargo su influencia en la coalescencia de las gotas de aluminio es mínima. Los fluoruros son muy eficientes para mejorar la coalescencia debido a que tienen la capacidad de disminuir la viscosidad de la mezcla de sales fundidas. Este hecho permite que las gotas de aluminio se muevan con mayor facilidad, consecuentemente existen mejores condiciones para que las mismas se unan al baño del metal fundido. Adicionalmente, estas sales presentan la capacidad para solubilizar los óxidos, por lo que concentraciones relativamente altas permiten mayor disolución de la capa superficial de óxido. De esta forma, se concluye que las adiciones de sales de flúor se generan un ataque a las capas de óxido formadas y una disminución de la viscosidad de la mezcla de sales fundidas, lo cual permite un aumento de la recuperación de aluminio metálico [6].

Las sales alcalinas de flúor actúan como surfactantes, es decir, se encargan de disminuir la tensión interfacial entre el aluminio líquido y las sales fundidas. En general, las adiciones de sales de flúor se realizan hasta una concentración de 10 % molar en la mezcla de sales fundentes. Se realizó una comparación de la influencia de distintos fluoruros, y se determinó que la efectividad de cada una sigue el siguiente orden creciente, $\text{Na}_3\text{AlF}_6 < \text{LiF} < \text{CaF}_2 < \text{MgF}_2 < \text{NaF} < \text{KF}$. Sin embargo, el NaF se vuelve más efectivo que el KF para concentraciones mayores que 10 % molar. Sin embargo, la adición de fluoruros no siempre es beneficiosa, puesto que estas sales presentan puntos de fusión superiores a 950 °C, lo cual ocasiona que la mezcla de sales fundida se vuelva más densa, lo cual limita su uso en este tipo de procesos [5].

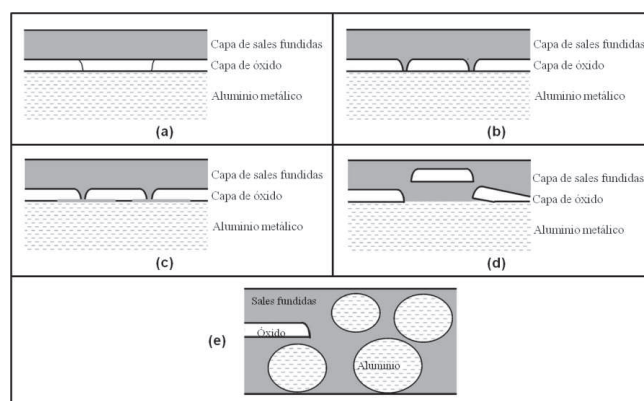


Figura 1. Mecanismo de remoción de la capa superficial de óxidos de aluminio [6].

El mecanismo de acción de la mezcla de sales fundentes sobre la capa superficial de óxido es muy complejo, el mismo se representa en la Figura 1. Los óxidos presentan una estructura parecida a unas pequeñas placas ásperas, los mismo que se disponen de tal manera que forman una red continua de material. Esto implica que presentan una alta superficie específica, lo cual favorece que el aluminio metálico sea atrapado al interior de la red de óxidos. La ruptura de la capa superficial de óxido se atribuye a un ataque corrosivo generado por la presencia de la mezcla de sales fundida (a). Este ataque permite debilitar y fracturar la red de óxidos en los bordes (b), luego, las sales fundidas penetran las fracturas formadas (c), de este modo los fragmentos de óxidos se separan del aluminio (d). Es así que el metal queda libre y, a la vez, es protegido por las sales fundidas, de esta manera, se forman las gotas de aluminio líquido que posteriormente, se aglomerarán (e).

2 Materiales y Métodos

2.1 Materiales

Todos los reactivos utilizados fueron de grado técnico puesto que fueron utilizados para disolver metales preciosos y las impurezas no producen interferencia en el análisis.

Para la determinación del contenido de metales pesados en los residuos de aluminio, se utilizó un equipo de espectrofotometría de absorción atómica AAnalyst 300 PERKIN ELMER.

Para la caracterización física y química de la escoria se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca Tescan con analizador de Rayos X Quantax. Para la caracterización mineralógica de la escoria de fundición, se empleó un equipo de difracción de rayos X, D8 ADVANCE, BRUKER axs.

Para los ensayos de fusión, se utilizó una mufla eléctrica M-BF51800, LINDBERG/BLUE.

Para el análisis de calidad de los productos de aluminio, se empleó un espectroscopio de chispa, BRUKER Q4 TASMAN.

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterización física de la escoria de fundición

La caracterización física de la escoria comprendió un análisis de microscopía electrónica de barrido, con el fin de analizar estructura de la superficie de la escoria.

2.2.2 Caracterización química de los residuos de aluminio

La caracterización química de los residuos de aluminio se realizó para determinar la concentración de metales pesados en cada uno de los materiales. Para estos ensayos, se disolvió 1 g de cada muestra en ácido clorhídrico

(1 : 1), se aforaron la soluciones y se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica.

Adicionalmente, se realizó un análisis semicuantitativo de la superficie de la escoria, empleando microscopía electrónica de barrido, con el fin de determinar la presencia y concentración de distintos elementos químicos.

2.2.3 Caracterización mineralógica de la escoria de fundición

La caracterización mineralógica se realizó para determinar los compuestos presentes en la escoria, así como su concentración. Para esto se extrajeron pequeñas limallas de la escoria, para lo cual se empleó un taladro.

2.2.4 Selección de sales de cloro para la fusión de residuos de aluminio

Se realizaron ensayos de fusión para cada material en presencia de diferentes sales de cloro (KCl, NaCl, BaCl₂, MgCl₂, MnCl₂, NH₄Cl y CaCl₂). Los ensayos de fusión se realizaron en una mufla eléctrica a 850 °C con el fin de trabajar a una temperatura a la cual se fundan todas las sales, no obstante para los ensayos con BaCl₂, se trabajó a 1000 °C debido a su punto de fusión 962 °C.

2.2.5 Definición de parámetros de trabajo para la fusión de residuos de aluminio

Se realizaron ensayos de fusión para la definición de parámetros de trabajo, los mismos que se detallan a continuación. La definición de parámetros, se fundamentó en la recuperación de aluminio metálico, para lo cual se analizó la relación entre las cantidades del metal recuperado y la materia prima usada. La temperatura de trabajo inicial fue 850 °C.

a. Definición de la composición de la mezcla fundente

Para la definición de la composición de la mezcla fundente, se realizaron ensayos de fusión variando la concentración, en [% molar], del sistema binario KCl y NaCl.

b. Definición de la carga de mezcla de fundente

La carga de mezcla fundente se refiere a la relación entre las cantidades de sales fundentes y la materia prima. Para la definición de este parámetro, se realizaron ensayos de fusión variando la carga de sales, en [% peso], desde 0 a 100.

c. Definición del tiempo de fusión

Para la definición de este parámetro, se realizaron ensayos de fusión, variando el tiempo de operación, en horas, desde 0 a 3 h.

d. Definición de la temperatura de trabajo

Para la definición de la temperatura de trabajo, se realizaron ensayos de fusión donde se replicaron la definición de los parámetros antes mencionados para temperaturas de 800, 750, 700 y 660 °C.

e. Análisis de la influencia de agitación en la fusión de limallas de aluminio

Se realizaron ensayos de fusión para las limallas de aluminio, donde se aplicó agitación mecánica a través de una varilla, con el objetivo de analizar la influencia de la agitación en el proceso de fusión. Se replicaron los ensayos de definición de parámetros antes descrita para las limallas, con la diferencia de que se aplicó agitación en todos los ensayos.

f. Análisis de la influencia de adición de sales de**flúor en la mezcla fundente**

Con base en los parámetros de trabajo definidos, se realizaron ensayos de fusión con adición de sales de flúor (NaF, CaF₂ y KF). La concentración de estas sales se varió de 0 a 10 [% molar], de modo que se pueda analizar su influencia en el proceso de fusión de residuos de aluminio.

3 Análisis**3.1 Caracterización de los residuos industriales y electrónicos de aluminio**

Las concentraciones de los metales pesados, se presenta en la Tabla 1.

Residuo de aluminio	Concentración [%]										
	Al	Mg	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn	Pb	Cr	Si	Sn
Limallas de corte	98,45	0,30	0,23	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Limallas de extrusión	98,59	0,59	0,30	0,06	0,05	0,06	0,02	0,03	0,02	< 0,001	< 0,001
Disipadores de calor	98,33	0,52	0,30	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	< 0,001	< 0,001
Escoria de fundición	98,13	0,97	0,30	0,05	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	< 0,001	< 0,001

Tabla 1. Concentraciones de metales pesados en los desechos industriales y electrónicos de aluminio

Los cuatro materiales analizados, presentaron composiciones similares, siendo el dato más importante la concentración de aluminio, la cual es aproximadamente 98 % en todos los casos. Para las limallas y los disipadores de calor, se conoce que el aluminio se encuentra en su estado metálico, ya que estos materiales han sido tratados en procesos de manufactura, sin embargo en el caso de la escoria, no se conoce si el aluminio se encuentra en su forma metálica o formando parte de algún compuesto. Otros elementos de interés son el magnesio y el hierro, los cuales constituyen elementos que causan interferencias en la fundición de materiales de aluminio. El hierro presenta concentraciones similares y bajas en todos los materiales, sin embargo para el caso del magnesio se puede observar que, en la escoria, existe una concentración significativa cercana al 1%. Para el resto de elementos analizados, se puede observar que las concentraciones son muy bajas o se encuentran por debajo del límite de detección.

Con el fin de obtener un análisis más detallado acerca de la caracterización de la escoria, se realizó un análisis superficial a través de microscopía electrónica de barrido conjuntamente con un análisis elemental semicuantitativo, las imágenes obtenidas se presentan en la Figura 2.

El análisis elemental semicuantitativo se presenta en la Tabla 2.

Elemento	Concentración [%]
Al	58,47
O	31,24
Mg	9,34
Fe	0,94

Tabla 2. Análisis semicuantitativo (EDX) de la escoria de fundición de chatarra

Así mismo, con el fin de determinar los compuestos presentes en la escoria se realizó un análisis de difracción de rayos X, el mismo que se detalla en la Tabla 3.

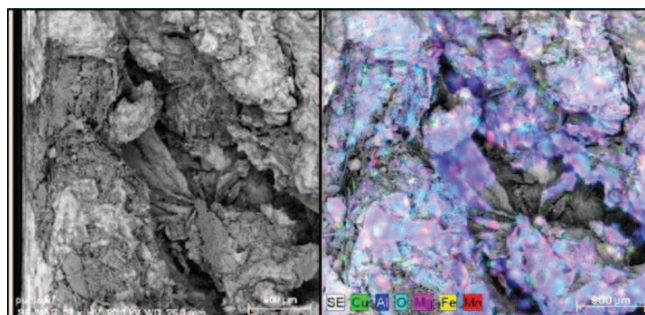


Figura 2. Análisis superficial de la escoria de fundición.

Mineral	Fórmula	Contenido [%]
Aluminio	Al	97
Hierro	Fe	1
Espinel	Al ₂ MgO ₄	1
Óxido de cobre, aluminio y níquel	(Cu, Ni)Al ₂ O ₄	1

Tabla 3. Análisis de difracción de rayos X (DRX) de la escoria de fundición de chatarra

De esta forma se puede observar que en la superficie

de la escoria se ha formado una capa de óxidos de magnesio y aluminio (espinel), lo cual se refleja en las concentraciones altas de magnesio y oxígeno en la superficie del material. Esto implica que este compuesto es el que atrapa al aluminio metálico, y no la capa de alúmina que se forma generalmente en las escorias de aluminio.

3.2 Influencia de las sales de cloro en el proceso de fusión de residuos de aluminio

En la Tabla 4, se presentan las recuperaciones de aluminio para los ensayos de fundición de cada material en presencia de distintas sales de cloro.

Sal de cloro	Recuperación de aluminio metálico [%]			
	Disipadores de calor	Limallas de corte	Limallas de extrusión	Escoria de fundición
Cloruro de sodio (NaCl)	87,3	74,4	86,0	51,2
Cloruro de potasio (KCl)	91,5	79,2	89,0	54,0
Cloruro de calcio (CaCl ₂)	53,2	2,0	3,5	28,8
Cloruro de magnesio (MgCl ₂)	69,8	9,2	9,5	39,2
Cloruro de manganeso (MnCl ₂)	43,8	0,0	0,0	18,4
Cloruro de amonio (NH ₄ Cl)	38,9	0,0	0,0	17,2
Cloruro de bario (BaCl ₂)	66,8	4,4	3,0	37,6

Tabla 4. Recuperaciones de aluminio para la fundición de desechos en presencia de distintas sales de cloro

Los cloruros crean una barrera protectora alrededor de los materiales para evitar la oxidación del aluminio contenido en cada material. En el caso de la escoria, también favorece la remoción parcial de la capa de espinel. Los cloruros de sodio y potasio constituyen las sales más efectivas para evitar la oxidación del metal, ya que permiten obtener las recuperaciones de aluminio más altas para todos los casos. El KCl es un poco más efectivo que

el NaCl por presentar un punto de fusión menor, lo cual le permite fundirse con mayor facilidad y rodear al aluminio de los materiales.

En la Tabla 5, se presentan los resultados del análisis de calidad para el aluminio metálico recuperado en los ensayos de en presencia de KCl y NaCl, por ser los mejores resultados.

Residuo de aluminio	Sal Fundente	Concentración [% peso]				
		Al	Si	Fe	Cu	Mg
Limallas de corte	KCl	98,70	0,49	0,34	0,03	0,02
	NaCl	98,60	0,54	0,41	0,03	0,04
Limallas de extrusión	KCl	98,90	0,45	0,31	0,02	0,01
	NaCl	98,70	0,42	0,28	0,02	0,02
Disipadores de calor	KCl	98,60	0,50	0,29	0,04	0,02
	NaCl	98,60	0,51	0,27	0,04	0,01
Escoria de fundición	KCl	98,40	0,53	0,44	0,03	0,04
	NaCl	98,50	0,54	0,45	0,04	0,04

Tabla 5. Análisis de calidad de los productos de los ensayos de selección de sales de cloro

Los análisis de calidad permiten establecer que la fusión en presencia de sales de cloro permite obtener un producto con un contenido de aluminio superior al 98 %, en todos los casos, de modo que estas sales no solo protegen al material, también eliminan impurezas presentes en el mismo. Los contenidos de magnesio y hierro, que constituyen las impurezas más comunes en el aluminio, presentan concentraciones menores al 1 %. Por último, se puede observar la presencia de otros elementos, sin embargo, sus concentraciones son menores al 1 %, por

lo que no constituyen impurezas significativas. De esta manera, se puede establecer que el proceso realizado permite obtener aluminio metálico que cumple los requerimientos del mercado.

3.3 Definición de parámetros de trabajo para la fusión de residuos de aluminio

En la Tabla 6, se presentan los mejores parámetros de operación para la fundición de cada residuo analizado.

Residuo de aluminio	Temperatura °C	Composición [% molar]	Carga de mezcla fundente [% peso]	Tiempo [h]	Recuperación [% peso]
Disipadores de calor	850,0	KCl= 90,0 NaCl= 10,0	100,0	1,0	97,6
Limallas de extrusión	850,0	KCl= 70,0 NaCl= 30,0	50,0	0,3	98,5
Limallas de corte	850,0	KCl= 100,0 NaCl= 0,0	100,0	0,5	93,6
Escoria de fundición	750,0	KCl= 50,0 NaCl= 50,0	30	2,0	71,6

Tabla 6. Parámetros de operación para la fundición de residuos de aluminio

3.3.1 Fusión de disipadores de calor

Los disipadores de calor presentan una capa de pintura de recubrimiento la cual permite tener una protección adicional para el material, es así que este material se funde con facilidad, sin embargo la implementación de una capa de sales fundentes permite incrementar la recuperación hasta valores superiores a 90 %. Al emplear una mezcla 90 [% molar] de KCl y 10 [% molar] de NaCl, se recuperó 97,6 % del aluminio contenido en el material. El contenido de KCl en la mezcla es superior, ya que a 850 °C, esta sal se funde con mayor facilidad que el NaCl, de modo que es posible recubrir de mejor manera el material para protegerlo contra la oxidación. Así mismo, por la forma que presentan estos materiales, se requiere una carga alta de sales que permitan recubrir toda la superficie del material, evitando la formación de óxidos superficiales. En lo que se refiere al tiempo de fusión, se definió que se requiere 1 h para obtener la mejor recuperación, lo cual indica que debido a la alta temperatura, el material se funde casi por completo, quedando tan solo la capa de pintura quemada, y el aluminio fundido en la parte inferior.

3.3.2 Fusión de limallas de aluminio

Para la fundición de limallas, se observó que la implementación de agitación mecánica permite acelerar el proceso y a la vez mejorar la recuperación. El material se

fragiliza a temperaturas superiores a 700 °C, lo cual permite insertar una varilla para mezclar el aluminio fundido y las limallas sin fundir, de modo que la transferencia de calor mejora así como la difusión de las sales fundidas sobre las limallas, lo cual favorece la recuperación de aluminio. Se hicieron pruebas de agitación con una varilla de madera y una varilla de acero inoxidable para agitar la mezcla. En la Figura 3, se presentan dos secciones de productos de aluminio luego de la fusión con agitación, la primera empleando una varilla de madera y la segunda, una varilla de acero inoxidable. Se realizó un análisis elemental semicuantitativo de las superficies de estas secciones de aluminio, a través de microscopía electrónica de barrido. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

La agitación con varilla de madera no es conveniente, ya que la misma sufre un proceso de combustión por la temperatura de trabajo, lo cual ocasiona que el C₂ liberado quede atrapado en el aluminio, generándose así las cavidades que se observan en la Figura 3. De esta forma, se establece que la muestra de aluminio recuperado se contamina por la combustión que ocurre, lo cual ocasiona que la calidad del producto disminuya. Por otra parte, la muestra obtenida al agitar la mezcla con una varilla de acero inoxidable no presenta impurezas, puesto que su contenido es principalmente aluminio, el oxígeno existente se debe a la oxidación superficial que se produce por el contacto del material con la atmósfera.

Elemento	Sección obtenida con agitación con varilla de madera	Sección obtenida con agitación con varilla de acero inoxidable
Aluminio [%]	79,79	95,85
Oxígeno [%]	5,02	4,15
Carbono [%]	15,19	No se detectó

Tabla 7. Análisis semicuantitativo de las superficies de las secciones de aluminio

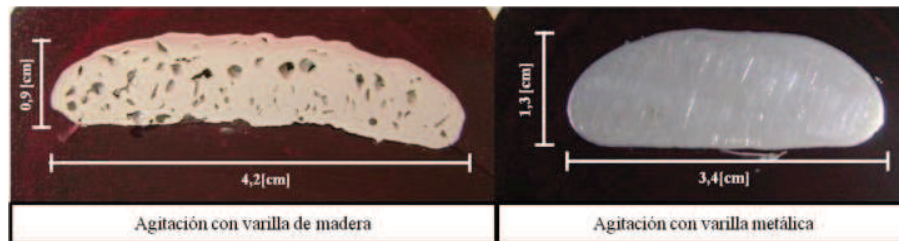


Figura 3. Aluminio obtenido luego de agitar la mezcla de limallas sin fundir y aluminio líquido durante la fundición.

En el caso de los dos tipos de limallas, el mecanismo de fundición es similar al de los disipadores de calor, es decir, las sales evitan la oxidación del material. Si bien estos materiales presentan una composición química muy similar, la fundición no se produce de la misma manera, ya que influye mucho el tamaño de partícula. Esto se debe a que la oxidación es un proceso superficial, por lo que en las partículas pequeñas, la formación de óxidos se facilita por el alto valor que presenta la relación área superficial/volumen. Es así que se puede observar que las limallas de corte requieren una carga fundente de 100 % formada tan solo de KCl, puesto que esta sal se funde con facilidad a la temperatura de trabajo, lo cual permite que el material sea recubierto por completo. En el caso de las limallas de extrusión, la carga es considerablemente más baja, 30 %, con una composición 70 [% molar] de KCl y 30 [% molar] de NaCl, ya que este material presenta un tamaño de partícula más grande, por lo que no se oxida con tanta facilidad, es así que no requiere gran cantidad de sal para su protección. Así mismo, el hecho de no oxidarse con tanta facilidad, permite obtener una recuperación más elevada que la obtenida en la fundición de limallas de corte. Por último, se puede observar que el tiempo de fundición es relativamen-

te corto, puesto que la agitación permite homogenizar la mezcla y mejorar la transferencia de calor, lo cual acelera el proceso.

3.3.3 Fusión de limallas de aluminio

La escoria se caracteriza por la presencia de una capa superficial de espinel, la cual se encarga de atrapar al aluminio metálico. Es así que en este caso, la fundición de este material se produce por acción de la protección contra la oxidación y, a la vez, por la remoción de la capa de espinel. Se definió que la mejor temperatura de trabajo fue de 750 °C, puesto que temperaturas mayores provocan que la capa no pueda ser removida. Así mismo, el hecho de trabajar con una temperatura relativamente baja, precisa que se emplee una mezcla equimolar de KCl y NaCl que se funde a 660 °C, de modo que se puedan llevar a cabo los dos mecanismos de fundición antes mencionados. Adicionalmente, existen secciones donde el aluminio metálico está expuesto, por lo que se funde tan solo por efecto de la temperatura, es decir, no requiere estar recubierto por una capa de cloruros.

En la Tabla 8, se presenta el análisis de calidad de los productos de fundición de los residuos de aluminio.

Residuo de aluminio	Concentración [%]				
	Al	Si	Fe	Cu	Mg
Disipadores de calor	99,10	0,46	0,13	0,01	0,17
Limallas de extrusión	99,10	0,41	0,22	0,01	0,04
Limallas de corte	99,20	0,44	0,20	0,01	0,01
Escoria de fundición	99,20	0,41	0,20	0,01	0,01

Tabla 8. Análisis de calidad de los productos de los ensayos fusión de residuos de aluminio

La composición de todos los productos de fundición es similar, ya que presentan un contenido de aluminio superior al 99 %, y las concentraciones del resto de elementos son menores al 1 %. Las sales fundentes permiten remover impurezas, mejorando la calidad del producto, con el fin de cumplir los requerimientos establecidos por el mercado comercial.

3.4 Influencia de las sales de flúor en el proceso de fusión de residuos de aluminio

En las Figura 4, se presenta la influencia de la adición de fluoruro de sodio en la mezcla fundente para cada residuo empleado en la presente investigación.

La adición de fluoruro de sodio en la fundición de los 4 tipos de desechos de aluminio, provoca la disminución de la recuperación de aluminio metálico, esto se debe a que el fluoruro de sodio presenta una temperatura de fusión de 992 °C, lo que ocasiona que la mezcla de sales fundida se vuelva más espesa, dificultando la difusión de la misma sobre los desechos de aluminio. Adicionalmente, se probó la influencia de la adición de fluoruro de calcio y fluoruro de potasio en la mezcla fundente, y al igual que en el caso del fluoruro de sodio, estas sales provocaron que la recuperación de aluminio metálica disminuya al aumentar su concentración. De esta forma se establece que a mayor concentración de fluoruros, la recuperación es menor, por lo que no es conveniente la implementación de estas sales junto con los cloruros.

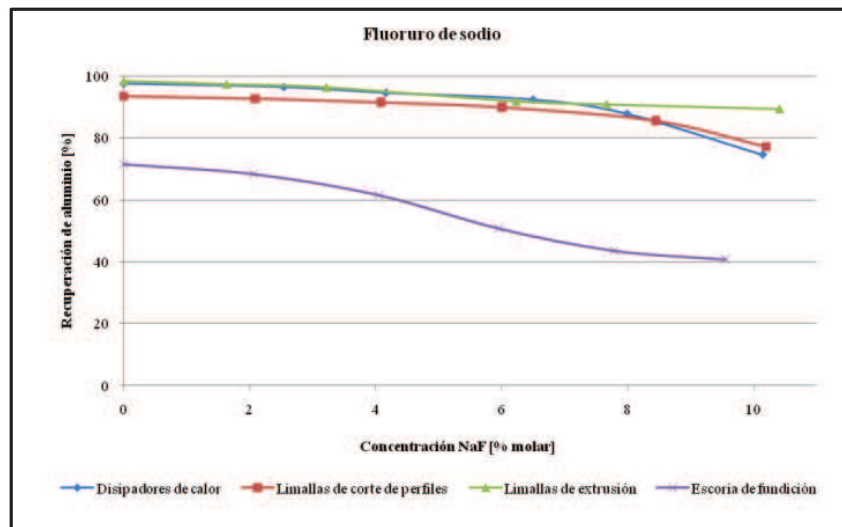


Figura 4. Influencia de la adición de fluoruro de sodio en la mezcla fundente.

4 Conclusiones

- Los residuos de aluminio estudiados presentan un contenido de aluminio superior al 90 %. Se demostró que es factible recuperar el metal mediante la fundición de los residuos, obteniéndose un producto que cumple con los requerimientos del mercado. Sin embargo, en el caso de la escoria se presenta una capa de espinel, la misma que atrapa al aluminio y dificulta su recuperación.
- La fundición de los residuos se realizó en presencia de mezclas fundentes de KCl y NaCl, para evitar la oxidación del metal y para remover impurezas del producto final. Se recomienda las siguientes condiciones de trabajo para cada material. Los disipadores de calor se deben fundir a 850 °C durante 1 hora con una carga de sales del 100 % y una composición de KCl y NaCl de 90 y 10 [% molar], respectivamente. Para las limallas, se debe trabajar a 850 °C durante 0,5 horas aproximadamente, sin

embargo, para las limallas de extrusión se emplea una carga de sales del 50 % con una composición de KCl y NaCl de 70 y 30 [% molar], y para las limallas de corte, se emplea una carga del 100 % de KCl. Por último, para la escoria de fundición se opera a 750 °C con una carga de sales del 30 % con una composición equimolar de KCl y NaCl durante 2 horas.

- La adición de fluoruros en la fundición de los residuos de aluminio genera un efecto negativo en la recuperación de aluminio metálico.

Agradecimientos

Los autores del presente artículo dejan constancia de su agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional por el apoyo financiero brindado a este trabajo de investigación, a través del Proyecto interno PIS 09-04 y al personal del Departamento de Metalurgia Extractiva por su colaboración profesional.

Referencias

- [1] Asociación Europea de Aluminio (EAA), Organización de Refinadores y Refundidores de Aluminio de Europa (OEA) (2004) *Aluminium Recycling: The road to high quality products*, http://www.oea-alurecycling.org/de/verband/oea_eaa_aluminium_recycling.pdf. (Marzo, 2010)
- [2] Boin U. M. J., y Bertram M. (2005) *Melting Standardized Aluminum Scrap: A Mass Balance Model for Europe*, JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. <http://springerlink.com/content/n08g88v6j5211p80/fulltext.pdf>. (Diciembre, 2009)
- [3] Elías X. (2009) *Reciclaje de residuos industriales*, Segunda edición, Ediciones Díaz de Santos, España, pp. 507, 811.
- [4] Instituto de Asuntos Públicos (INAP), Universidad de Chile (UC) (2004) *Análisis comparativo sobre el uso eficiente de la energía en la minería de APEC*, Programa de estudios e investigaciones en energía. <http://www.natlaw.com/interam/ch/eg/sp/spcheg00004.pdf>. (Enero, 2010)
- [5] Soares J. A., y Romano D. C. (2002) *Effect of salt/oxide interaction on the process of aluminum recycling*, Journal of light metals, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Polytechnic School, University of Sao Paulo. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6W7V-4778B95-4&_user=10&_coverDate=05%2F31%2F2002&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1425792050&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=446924680fb3ef52bb1530e249d77211, pp. 89 - 93. (Febrero, 2010)
- [6] Totten G. E., y MacKenzie D. S. (2003) *Handbook of Aluminum*, Editorial Marcel Dekker, Inc., Nueva York, Estados Unidos, Volumen 1, p. 7, Volumen 2, pp. 115 - 148.