

ISASMELT™ PARA RECICLAJE DE PLOMO

*Bill Errington¹, Peter Hawkins², Andrew Lim³

*¹Xstrata Technology
Level 4, 307 Queen Street
Brisbane, Australia 4000*

(*Autor correspondiente: berrington@xstratatech.com)

*²Xstrata Zinc
Botany Road
Northfleet
Kent, UK*

*³Metal Reclamation (Industries) SDN, BHD,
Pulau Indah Industrial Park
West Port
Selangor, Malaysia*

RESUMEN

ISASMELT™ es una tecnología bien establecida para la fusión de cobre primario y de concentrados de plomo. Menos conocida es su aplicación para el reciclaje de desechos de baterías de plomo. Hasta ahora se han construido dos plantas ISASMELT™ para el reciclado de baterías de plomo, produciendo un plomo blando con bajo antimonio y una escoria de antimonio y plomo a partir de la cual pueden producirse una aleación de antimonio y una escoria de silicato con bajo contenido en plomo. La captura del azufre se obtiene ya sea usando un lavado con cal o mediante la desulfurización de pasta antes de la fusión. Este documento aprovecha la experiencia ganada en estas plantas y la extrapola a una planta a gran escala (>300,000 tpa).

INTRODUCCIÓN

La tecnología ISASMELT™ está ahora bien establecida como una de las tecnologías convencionales para fusión primaria del cobre [1]. Tres de las plantas en operación tratan cada una más de 1.000.000 tpa de concentrados de cobre, siendo la máxima producción demostrada hasta la fecha de aproximadamente 1.400.000 tpa de concentrados.

Esta tecnología también está ganando una mayor aceptación para la fusión primaria del plomo, con una planta de plomo de 80.000 tpa en operación [2] y dos plantas adicionales en construcción. Adicionalmente, la tecnología ISASMELT™ es la parte fundamental del Sistema de Reciclaje Kayser (KRS) para cobre secundario en Lünen, Alemania y en la planta Umicore Precious Metals en Hoboken, Bélgica [3].

La aplicación de la tecnología ISASMELT™ para el reciclaje de baterías de plomo es menos conocida. Este documento trata sobre el desarrollo de la tecnología, las operaciones en planta en la compañía Britannia Refined Metals en el Reino Unido y en Metal Reclamation Industries en Malasia y la posible aplicación de la tecnología en una planta de plomo secundaria de gran capacidad (> 300.000 tpa de metal).

DESARROLLO DEL PROCESO DE RECICLAJE DE PLOMO

Las principales fuentes de alimentación de las fundiciones de plomo secundarias son las baterías de ácido-plomo para automoviles y usos industriales, las baterías para bicicletas eléctricas forman un componente en rápido crecimiento de materia prima de Asia. Típicamente las baterías son chancadas y separadas en sus componentes antes de su posterior tratamiento. La Tabla 1 muestra los principales componentes de una batería de ácido-plomo de los cuales solamente no se reciclan los separadores.

Tabla 1- Componentes de Batería de Ácido Plomo

Componente	Mallas	Pasta de Batería	Separadores	Caja de Batería	Acido
Composición	Pb, Sb, Ca, Sn	PbO ₂ , PbSO ₄	polyethileno fibra de vidrio	polypropyleno	H ₂ SO ₄ agua
Peso %	25 - 29 %	35 - 55 %	3.5 - 8 %	5 - 8 %	11 - 28 %

El desarrollo del proceso de plomo secundario ISASMELT™ fue enfocado en el diseño del proceso más eficiente para tratar la pasta de la batería y el metal de rejilla. Con este objetivo se realizaron pruebas piloto en Mount Isa, Australia usando una planta piloto ISASMELT™ de una escala de 250 kg. El proceso que se desarrolló y patentó al final fue fundamentalmente una operación de fusión directa en un solo horno a baja temperatura en donde se produjo un plomo blando relativamente puro (<0,05 % Sb) directamente de la pasta de batería usando una escoria con alto contenido de plomo como medio reactivo. Las impurezas en la pasta tales como el antimonio y la sílice se acumulan gradualmente en la escoria. A un cierto nivel de impurezas en la escoria, ésta fue retirada para su posterior tratamiento con el objetivo de producir una aleación plomo-antimonio. Luego el baño de escoria con alto contenido de plomo fue recargado en el horno y se continuó con la producción de plomo blando.

Aparte del trabajo en la planta piloto, se realizaron una serie de experimentos a escala de laboratorio en CSIRO, Melbourne para obtener una mejor comprensión de las particiones metálicas y de la cinética de la reducción [4].

Se encontró que el proceso se puede controlar fácilmente, los humos de plomo contenidos en el horno y un alto rendimiento fueron obtenidos en un horno relativamente pequeño. Los resultados positivos del trabajo piloto dieron suficiente confianza a MIM (ahora Xstrata) para aplicar la tecnología ISASMELT™ en su planta subsidiaria Britannia Refined Metals en Northfleet, Reino Unido.

PLANTA DE RECICLAJE DE PLOMO BRM

Introducción

El negocio principal de Britannia Refined Metals (BRM) es refinar el plomo primario producido en Mount Isa, Australia. En el año 2004 se instaló también una refinería de plomo secundaria en el mismo lugar. Antes de 1991, la refinería produjo 10.000 tpa de plomo usando un horno rotatorio corto. En 1991 BRM hizo mejoras en la planta para producir 30.000 tpa de plomo refinado y plomo en aleaciones. Esta modernización permitió a BRM cumplir con sus requerimientos de reducir los costos operativos, minimizar las emisiones de plomo y minimizar la cantidad de escoria final que se requiere eliminar.

La tecnología seleccionada fue la siguiente:

- Ruptura mecánica de la batería, separación y desulfurización de la pasta usando el proceso Engitec CX.
- Horno ISASMELT™ para fundir la pasta de la batería y las rejillas para producir plomo blando más una escoria de antimonio de plomo.
- Uso de un horno rotatorio existente para la reducción de escoria para producir una aleación de plomo y antimonio más una escoria final.

En la Figura 1 se muestra un diagrama de flujo de las Operaciones Secundarias en BRM.

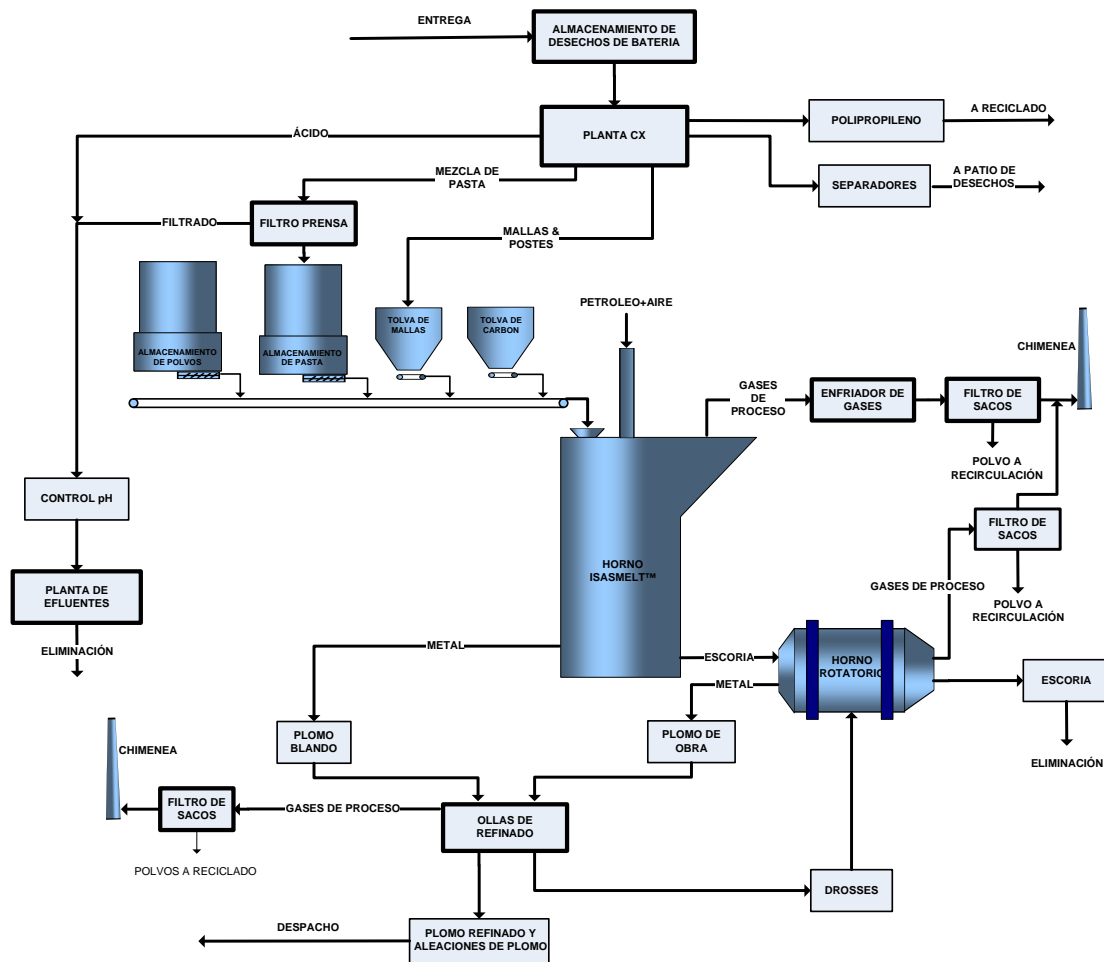


Figura 1– Flujo de Operaciones Secundarias en Britannia Refined Metals

Ruptura y Separación de la Batería

El sistema Engitec CX fue diseñado para chancar y procesar el total de baterías automotrices sin drenar. Antes del chancado inicial en un molino de martillos, se recolecta el ácido libre recuperado del depósito de desechos, luego se filtra y neutraliza antes de transferirlo a la planta de efluentes. Los materiales de la batería chancados son luego filtrados en húmedo para separar la pasta de los componentes metálicos u otros. La fracción de la pasta pasa por un tamiz de 0,6 mm a un tanque de recolección-densificación y luego a través de una transferencia por lotes es enviada hacia los tanques de desulfurización. El plomo metálico, el material de la caja y los separadores son alimentados a dos etapas de un separador hidrodinámico (sink/float) desde donde se puede recolectar cada fracción por separado. El polipropileno es vendido en tanto que el metal de la rejilla es fundido en el ISASMELT™ o fundido en el horno rotatorio.

Desulfurización de la Pasta

La pasta en pulpa es bombeada desde el tanque de retención de densificación a uno de los dos tanques de desulfurización. La solución de hidróxido de sodio (50%) es mezclada con la pasta, la cual reacciona para formar la solución de óxido de plomo y sulfato de sodio. Luego el óxido de plomo es recuperado por filtrado a través de un filtro prensa y es enviado a un depósito rotatorio Storall desde donde se extrae la pasta mediante un transportador de tornillo y se carga a una velocidad controlada hasta el horno ISASMELT™ a través de una correa de pesaje.

Operación del Horno ISASMELT™

El horno BRM ISASMELT™ consiste de un cilindro vertical con un revestimiento refractario. El diámetro interno del horno es de aproximadamente 1,8 m, el horno tiene también puertas en el techo para el ingreso de la alimentación, una entrada de lanza y una compuerta de salida de gases. Los productos, el plomo blando y la escoria de plomo con alto contenido de antimonio son colados desde el horno usando un orificio de colada individual y una canal giratorio basculante para dirigir los productos a uno de las tres ollas ubicadas en los rieles por debajo del piso de colada.

La pasta de la batería y los materiales de la rejilla son tratados en general en campañas separadas para simplificar el proceso de refinación posterior. En una campaña de pasta típica, primeramente se forma un baño de partida de pasta fundida. Luego la pasta es alimentada al horno junto con el coque o carbón como reductor. La adición del compuesto reductor se calcula para fundir toda la pasta a metal, sin afectar el volumen del baño de partida. El total del antimonio, sílice, hierro y otros componentes menores pasan a la fase de escoria. El plomo en la pasta es reducido para formar un baño de plomo blando con bajo contenido de antimonio (0,01 - 0,1 %), el cual es colado intermitentemente desde el horno en ollas, desde donde es transferido en estado líquido a las ollas de la refinería. La temperatura de operación del horno fue aproximadamente de 810 °C.

La producción de plomo blando continua hasta que se halla alimentado aproximadamente 150 toneladas de pasta en el horno, momento en el cual la escoria se vuelve rica en antimonio y contiene 55-65% de óxido de plomo. Aún cuando esta escoria puede ser reducida 'in situ' en el horno ISASMELT™ para producir la aleación plomo-antimonio la capacidad del horno fue maximizada con el uso del horno rotatorio para reducir la escoria de plomo. Este empleo dual de los dos hornos fue adoptado como proceso normal. El horno rotatorio también trata drosses provenientes de la refinería de plomo. La Figura 2 muestra la distribución del plomo en el proceso.

Los hornos ISASMELT™ generalmente operan con enriquecimiento de oxígeno en el aire soplado por la lanza. En BRM, la planta fue diseñada para tratar 7,7 tph de pasta sin enriquecimiento de oxígeno pero trata normalmente 12 tph de pasta. Las rejillas son fundidas en una campaña separada a velocidades de hasta 35 tph para producir un plomo blando (pero conteniendo un mayor contenido de antimonio que en el ciclo de pasta). Estas tasas de producción se duplican aproximadamente con el enriquecimiento del aire de lanza a 30% de O₂.

En los primeros años de operación, la producción se vio limitada por demoras asociadas con las dificultades de transporte de la alimentación y con los requerimientos de mantenimiento de la planta de chancado de baterías CX. Después de las mejoras en el sistema de transporte y del continuo mejoramiento en la planta CX, la planta

ISASMELT™ sobrepasó sus especificaciones de diseño en 1995 y las operaciones continuaron mejorando hasta el 2004 cuando Xstrata Zinc decidió salir del negocio de plomo secundario.

Existen numerosos aspectos positivos de la operación que incluyen mejoras significativas que se lograron en el rendimiento del revestimiento refractario del horno a pesar de la naturaleza agresiva de la escoria de litargirio. El reemplazo total de los ladrillos fue sólo necesario después de la producción de 60.000 a 70.000 toneladas de plomo; aunque fue necesario realizar reparaciones parciales después de aproximadamente 20.000 - 22.000 toneladas de plomo. La facilidad de la operación y robustez del proceso se demostraron cuando, después del período de puesta en marcha y mejoras en algunos de los equipos de la planta, se redujo en forma significativa el personal de operaciones secundario y al mismo tiempo se mantuvo la producción de plomo. La operación normal de la planta fue apoyada en forma significativa por dos tolvas de alimentación Storall (fabricadas por Mitchell Engineering), las cuales fueron utilizadas para suministrar cantidades controladas de pasta y polvo compactado respectivamente al horno ISASMELT™. Los costos de combustible se redujeron usando petróleo 200 de segunda recuperado en lugar de destilado para la lanza y usando gas natural para el quemador de retención.

Un aspecto negativo de la operación secundaria fue la incapacidad de producir una pasta con bajo contenido de sodio después de la desulfurización a pesar de usar NaOH como reactivo. El sodio residual en la pasta (hasta 1,5 %) produjo la formación de una escoria de dos fases en el horno ISASMELT™ que consistió de una escoria de litargirio que contiene óxido de plomo entre 55 y 85% y una escoria de menor densidad de sulfato de sodio que contiene hasta 35% de Na. A pesar de las dificultades inherentes de esta situación, los operadores aprendieron a manejar esto mediante la introducción de un orificio de colada superior y separado para la escoria de la soda. El sulfato de sodio fue periódicamente colado desde el horno para permitir un control constante del baño de escoria de plomo y del proceso de fundición del plomo blando.

El sodio en la pasta pudo haberse reducido significativamente mediante la inversión en un mejor lavado y filtración de la pasta; pero esto a su vez probablemente habría requerido una mayor inversión en la planta de efluentes.

Una descripción más detallada de la planta BRM se puede encontrar en el estudio de Ramus y Hawkins [5].

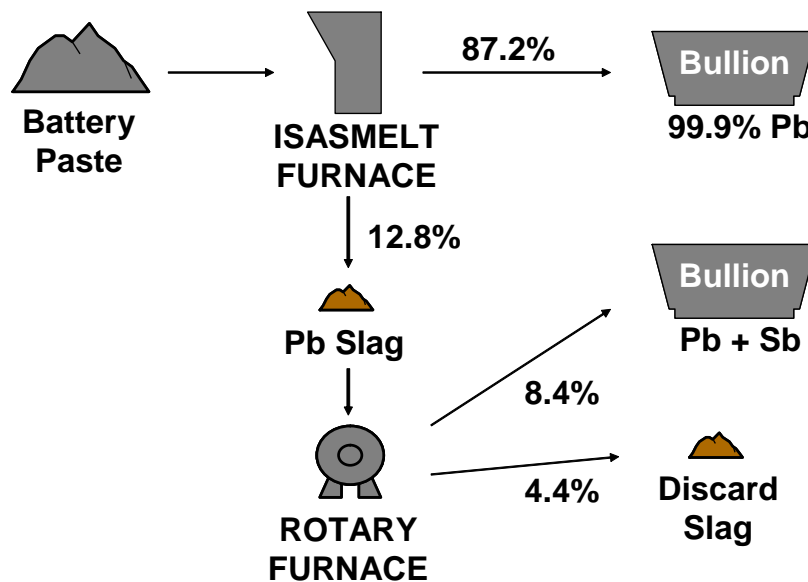


Figura 2 – Distribución de plomo en el Proceso BRM

PLANTA DE RECICLAJE DE PLOMO MRI

Introducción

Metal Reclamation (Industries) Sdn. Bhd. (MRI) ha estado operando una planta de plomo secundario en Malasia desde 1972. La tecnología en 1995 se basó en el uso de un horno rotatorio de cuerpo corto que producía aproximadamente 1000 toneladas mensuales de plomo refinado y plomo en aleaciones. Era claro que esta producción no cumpliría con las exigencias del mercado durante mucho tiempo y, por lo tanto, se puso en marcha un plan de largo plazo para aumentar la capacidad y cumplir con las exigencias del mercado. Con este objetivo MRI compró terrenos en las afueras de Kuala Lumpur para reubicar y expandir su negocio. MRI escogió a ISASMELT™ como la tecnología más apropiada que les permitiría cumplir con cualquier requerimiento ambiental futuro con respecto a emisiones de azufre y a eliminación de escoria.

Descripción de la Planta

La planta de MRI está diseñada para producir aproximadamente 40.000 tpa de plomo refinado y plomo en aleaciones a partir de materia prima consistente en más de 70.000 tpa de residuos de batería. Las baterías son chancadas y separadas en un cortador de baterías de 40 tpa de fabricación local. Los plásticos de las baterías trituradas son embalados y vendidos para su reciclaje. La pasta de las baterías luego es mezclada con polvo reciclado y enviado a una tolva Storall para permitir una alimentación controlada al horno ISASMELT™. Las rejillas son alimentadas desde un recipiente usando un alimentador de correa de velocidad variable. Los recipientes de alimentación adicionales se usan para alimentar carbón, impurezas a flujos y velocidades controladas al horno ISASMELT™.

El horno ISASMELT™ es similar al horno BRM, pero tiene un diámetro externo de aproximadamente 2,5 metros. El plomo blando producido en el horno se cuele en forma intermitente a una de las dos ollas de 50 toneladas ubicadas cerca al horno. En la olla se mantiene un fondo de olla de plomo frío para enfriar el plomo entrante. El plomo enfriado luego es bombeado a las ollas de la refinería. La escoria del horno es colada a través de un orificio de colada de escoria exclusivamente dedicado a esta función y luego granulada y deshidratada usando un sistema de granulación de estanque agitado Paul Wurth.

Los gases de salida del ISASMELT™ son enfriados en dos etapas de enfriamiento por evaporación, luego limpiados usando un filtro de bolsas y posteriormente lavados -libres de SO₂- en un desulfurador de gases Chiyoda (FGD). En el FGD los gases de proceso son soplados en agua formando una fina capa de burbujas en donde el SO₂ es absorbido, oxidado por aire inyectado y luego neutralizado por una pulpa de caliza molida. El yeso así producido es deshidratado en un filtro de banda y luego vendido.

Descripción de la Operación de ISASMELT™

El horno ISASMELT™ fue diseñado para tratar aproximadamente 31.000 tpa de pasta de batería y 19.000 tpa de rejillas con las composiciones que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2- Composición del Material en MRI

Componente	Pasta	Rejillas
Pb	74.1	92.0
Sb	0.30	1.8
Cu	0.018	0.047
Zn	0.008	< 0.001
As	0.057	0.12
Bi	0.016	0.023
Ca	<0.05	< 0.001
SiO ₂	1.0	1.5
Sn	0.0	0.12
S	6.5	0.69
Al	< 0.05	< 0.001

- El diseño del proceso inicial consistió de las siguientes etapas:
- Fusión de la pasta de batería para formar un baño de partida.
 - Fusión de una mezcla de pasta, rejillas y polvo reciclado más el carbón para producir un plomo blando.
 - Colar el plomo blando a intervalos de unas pocas horas.
 - Después de aproximadamente 10-12 horas, terminando el ciclo mediante la colada y granulado de la mayoría de la escoria con alto contenido de plomo que contiene antimonio y otras impurezas. Esta escoria es apilada para futuros tratamientos.
 - Reestablecimiento del baño de partida y reinicio de la fusión.

El diseño del proceso inicial permitió un tiempo adecuado para reducir la escoria apilada en campañas. Las etapas de reducción consistieron en alimentar la escoria en el horno en condiciones de reducción continua para obtener aproximadamente 15-20 % de plomo en escoria mientras se agrega hierro (en finos) y cal. Cuando el baño de escoria alcanza a una profundidad adecuada, la reducción por lotes se inicia para reducir la escoria a < 1 % de plomo en la escoria final.

La distribución de plomo resultante de este proceso se muestra en la Figura 3. La escoria final se reduce de manera significativa en comparación con la operación del horno rotatorio y se demostró que pasa la prueba TCLP. Actualmente, sin embargo, MRI no tiene una salida para esta escoria, por lo cual pasa a una remoción controlada.

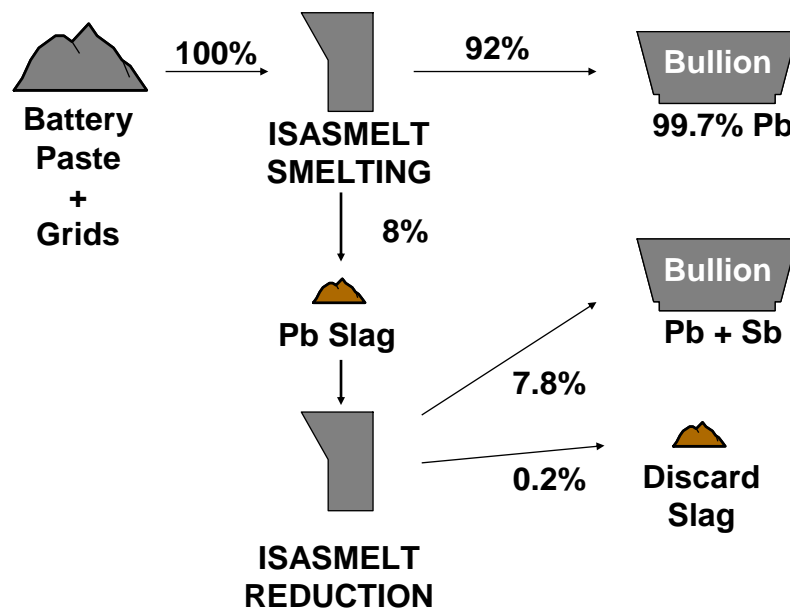


Figura 3 – Distribución de Plomo en el Proceso MRI

Desde la puesta en marcha en el año 2000, MRI realizó numerosos cambios y mejoras en la operación. Ellos ahora encuentran más económico realizar la reducción por lotes al término de cada ciclo de fusión, evitando así la necesidad de apilar y volver a fundir las escorias con alto contenido de plomo.

MRI ha demostrado la flexibilidad de su planta ISASMELT™ usándolo también para la fusión de concentrados de plomo primario (hasta el límite de su capacidad de lavado de gases) cuando las condiciones del mercado lo convierten en una propuesta económica atractiva. Al fundir los concentrados de plomo primario, MRI demostró que los concentrados pueden usarse para la reducción parcial de la escoria con alto contenido de plomo seguido por la adición de carbón para completar la reducción.

Las modificaciones adicionales realizadas por MRI incluyen el uso de hasta 20 tpd de oxígeno para aumentar la capacidad de la planta. Una modificación reciente consistió en convertir la planta de modo que pueda usar gas natural en vez de petróleo, generando así importantes ahorros en costos.

En general, cuando se compara con Britannia Refined Metals, MRI ha demostrado las ventajas del lavado de gases de proceso en comparación con la desulfurización de la pasta. Sin embargo, esta ventaja depende de tener un mercado para el yeso producido en el proceso. Actualmente, gran parte del yeso producido en MRI es vendido a la industria cementera.

En la Figura 4 se muestra una fotografía de la planta de MRI. En la Figura 5 se muestra un diagrama de flujo de la planta de MRI.



Figura 4 – Planta de Plomo Secundaria de MRI

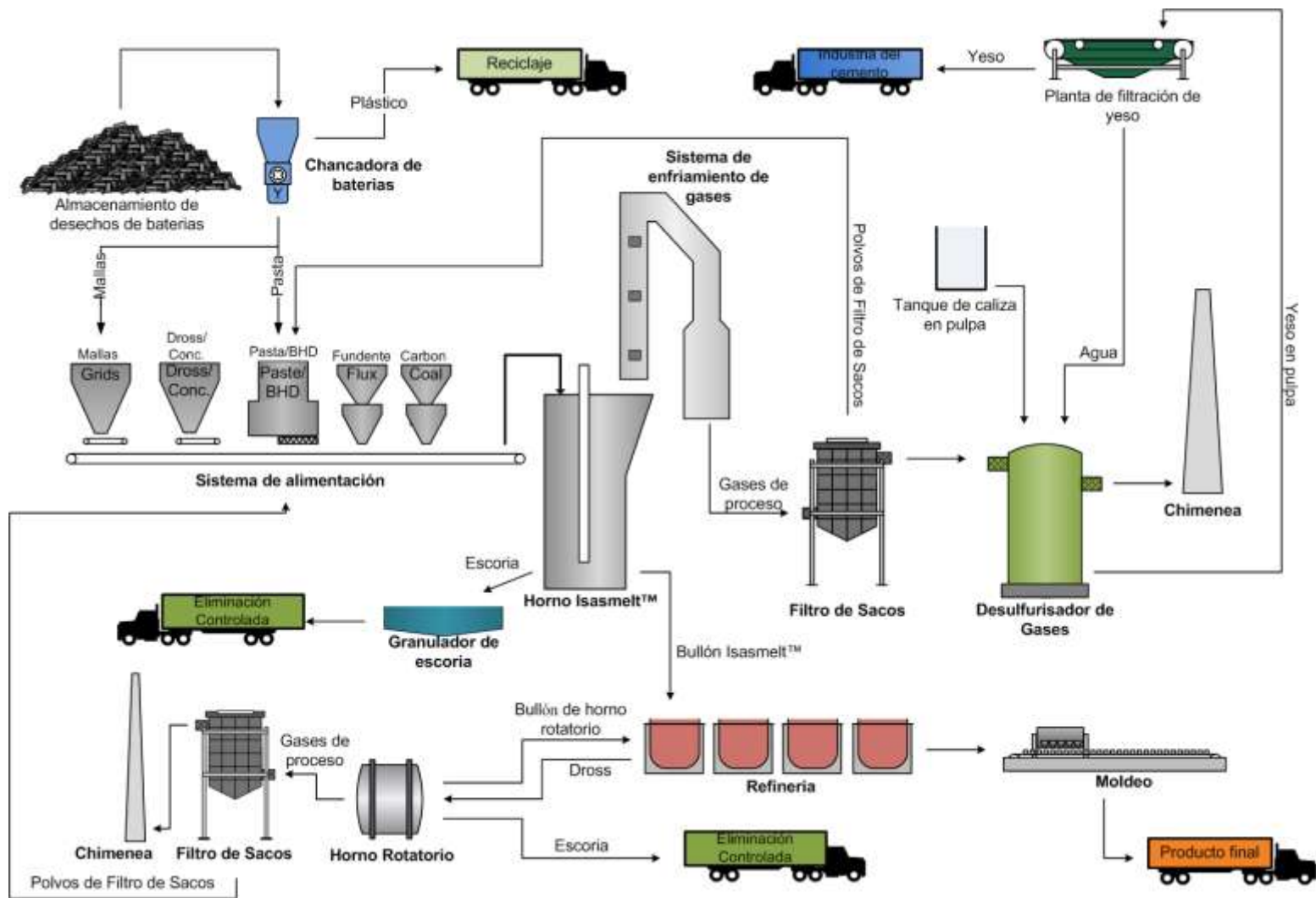


Figura 5 – Diagrama de flujo de las operaciones de Metal Reclamation Industries

PLANTA DE RECICLAJE DE PLOMO DE 300.000 TONELADAS ANUALES

La Tabla 3 muestra una comparación de algunos de los parámetros de operación y diseño de la planta para las actuales plantas ISASMELT™. Cabe destacar la amplia variación de los parámetros de operación y de los tamaños de horno relativamente pequeños que son requeridos para adaptar los diversos flujos de procesos.

Tabla 3 – Comparación de los Parámetros de Planta de ISASMELT™

Parámetro	Plomo Secundario	Plomo Primario	Cobre Primario
Alimentación (tpa)	40,000 - 60,000	150,000 - 250,000	650,000 - 1,400,000
Aire de Proceso (% O2)	21 - 25 %	25 - 40 %	60 - 90 %
Flujos en la Lanza (Nm3/hr)	5,000 - 9,000	15,000 - 25,000	20,000 - 70,000
Diámetro Interno, Horno (m)	1.8 - 2.5	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5
Captura de Azufre	Desulfurización de pasta Scrubber a Cal	Planta de Acido	Planta de Acido

Se puede observar que las capacidades de producción de las plantas de plomo secundarias son relativamente pequeñas en comparación con las plantas de fusión primarias. Esto refleja la naturaleza de la industria de plomo secundario. A pesar del hecho que el plomo secundario comprende más del 50% de la producción anual de plomo, el negocio se racionaliza sólo en fundiciones relativamente grandes en Norteamérica y Europa, en donde la fundición secundaria más grande es probablemente la fundición Doe Run Buick en Missouri, con una producción de aproximadamente 145.000 tpa. En otros países existe la tendencia de tener numerosos pequeños productores. Por ejemplo, hay más de 240 plantas de reciclaje de plomo registradas en India y aproximadamente 100 plantas registradas en China. Además de esto, en la mayoría de los países en desarrollo existe una gran industria de reciclaje de plomo informal y muy poco regulada que compete contra la industria formal. Un importante factor adicional es la Convención de Basilea que prohíbe el transporte transfronterizo de desechos peligrosos como los desechos de baterías. China, por ejemplo, no importa oficialmente ningún desecho de baterías de otros países.

Sin embargo, cuando uno observa el futuro, se puede esperar regulaciones ambientales cada vez más estrictas y el consiguiente cierre de pequeñas operaciones acompañadas por mayores requerimientos de procesamiento de plomo secundario. Por ejemplo, se espera que la producción de plomo secundario en China se duplique a más de 2.000.000 de toneladas por año de plomo para el año 2015 [6]. Según este escenario, y dando mayor importancia a la reducción de emisiones peligrosas, las grandes plantas de procesamiento que usan tecnología moderna como ISASMELT™ tienden a prevalecer más.

La Figura 6 muestra un ejemplo de los flujos de proceso para un horno ISASMELT™ capaz de producir más de 300.000 toneladas anuales de plomo blando desde una fuente similar en composición que la mostrada en la Tabla 2.

Las principales características de esta operación son:

- Enriquecimiento del aire de lanza hasta 40% de oxígeno.
- Producción continua de plomo blando que contiene 0,2 % de Sb o menos.

- Baja temperatura de operación (< 850 °C) como resultado del bajo punto de fusión de escoria PbO-Sb₂O₃
- Horno relativamente pequeño (3,0 - 3,5 m de diámetro interno).
- Producción de un contenido relativamente alto de SO₂ en el gas de salida final apropiado para la producción de ácido sulfúrico.

La escoria con alto contenido de plomo producida en el proceso puede ser apilada y tratada en campañas en el horno ISASMELT™ o transferida en estado líquido a un segundo horno pequeño (< 2 m de diámetro interno) para la recuperación de plomo y la producción de una escoria de descarte con bajo contenido de plomo más una aleación de plomo-antimonio.

Se debe observar que a pesar de una producción de plomo blando relativamente grande, esta planta es todavía pequeña en comparación con las plantas de fusión primaria con flujos de lanza de menos de un quinto del máximo usado en la fusión de cobre primario y un requerimiento de volumen de horno de aproximadamente la mitad de las plantas de cobre de mayor tamaño.

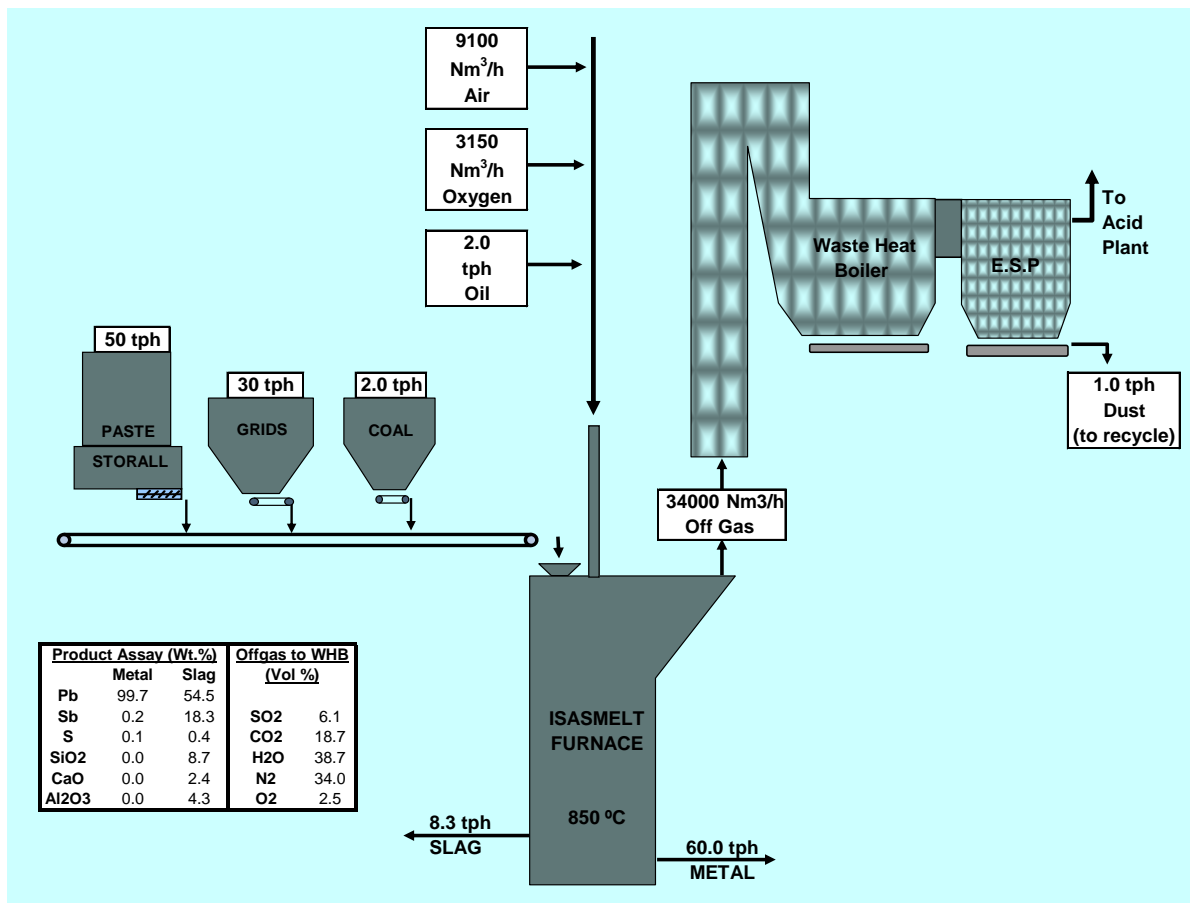


Figure 6 - Flujos de procesos para una Planta ISASMELT™ de Plomo Secundario de 300.000 toneladas por año.

En conclusión, la aplicación de la tecnología ISASMELT™ para la producción de plomo secundario ha sido muy positiva, con la tecnología que demuestra las siguientes ventajas en comparación con la operación tradicional de hornos rotatorios:

- Producción directa tanto de aleaciones tanto de plomo blando como de plomo-antimonio que produce una gran flexibilidad de mezcla.
- Capacidad para producir escorias silicatadas de desecho con bajo contenido de plomo, no lixiviable.
- Buena higiene en el proceso debido a la naturaleza cerrada del horno operando bajo presión negativa.
- Operación de un horno individual capaz de cualquier requerimiento futuro en la capacidad de planta.

REFERENCIAS

1. G. Alvear, P. Arthur and P. Partington, “Feasibility to Profitability with Copper ISASMELT™”, Proceedings of Copper 2010, Hamburg, Germany, June 2010, GDMB.
2. B. Errington, P. Arthur, J. Wang and Y. Dong, “The ISA-YMG Lead Smelting Process”, Proceedings of the International Symposium on Lead and Zinc Processing, Kyoto, Japan October 2005, T. Fujisawa et al., Eds., MMIJ, pp. 581-599.
3. F. Vanbellen and M. Chintinne, “The Precious Art of Metals Recycling”, Advanced Processing of Metals and Materials, F. Kongoli and R.G. Reddy, Eds., TMS, Warrendale, Pennsylvania, 2006, Vol. 1, 43-52.
4. S. Wright, S. Jahanshahi and W.J. Errington, “Reduction Kinetics of Slags produced from Recycling of Lead Batteries”, Pyrometallurgy for Complex Materials and Wastes, Melbourne June 1994, The Minerals, Metals and Materials Society, pp 121-132.
5. K. Ramus and P. Hawkins, “Lead/acid Battery Recycling and the new ISASMELT™ Process”, Journal of Power Sources, 42, (1993), pp 299-313.
6. C. Zhang and R. Zhang, “Current Status and Outlook on Chinese Secondary Lead Industry”, International Secondary Lead Conference, Macau, August/September 2009, Paper 1.3.