



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# **DESARROLLO DE UN PROCESO DE BRIQUETEADO Y SECADO PARA LA PRODUCCIÓN DE PLOMO METÁLICO A PARTIR DE RESIDUOS PLOMADOS DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

**NICOLÁS FERNANDO ACEVEDO SALAZAR**

PROFESOR GUÍA  
LEONEL NÚÑEZ LAZO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
RODRIGO PALMA HILLERNS  
ROBERTO CORVALÁN PAIVA

SANTIAGO, CHILE  
ENERO 2016

## **DESARROLLO DE UN PROCESO DE BRIQUETEADO Y SECADO PARA LA PRODUCCIÓN DE PLOMO METÁLICO A PARTIR DE RESIDUOS PLOMADOS DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO**

En este proyecto se desarrolla una novel tecnología para procesar residuos de baterías de plomo-ácido (BPA) en forma de briquetas para producir plomo metálico (Pb<sup>0</sup>). En la técnica de procesamiento actualmente empleada, las baterías son separadas de los agentes ácidos de su contenido y por procesos de trituración y separación física, en celdas de flotación, se genera la pasta de baterías (PBat) propiamente tal; que corresponde a la materia prima para producir briquetas. En general, el manejo y la manipulación de la PBat son procesos altamente contaminantes que, en exposiciones prolongadas sin protección adecuada, pueden afectar la salud de los trabajadores y, eventualmente, contaminar el entorno de la instalación. Este proyecto de innovación tecnológica busca desarrollar un procesamiento limpio del material plomado, a través de intervenciones en el manejo en planta, transporte y/o almacenamiento del material.

El objetivo general del proyecto es el diseño básico de una planta de briqueteado y secado de residuos plomados. Los objetivos específicos son: i) Desarrollar el diseño conceptual que define los equipos principales de la instalación, ii) Desarrollar el diseño básico para determinar las especificaciones de los procesos involucrados, y iii) Efectuar estudios de factibilidad técnico-económica de la unidad.

Para el diseño conceptual de la unidad se revisa el estado del arte respecto del proceso de reciclaje de plomo, de los procesos de aglomeración, del secado de pellets y de briquetas. Para el diseño básico, se considera la caracterización de la PBat y se desarrolla un programa experimental de ensayos para establecer una ruta de procesos, con sus respectivos parámetros de operación. Para la factibilidad técnico-económica primero se analiza el mapa de riesgos de la innovación y de las alternativas de manejo, luego se efectúa un análisis costo-beneficio desarrollando los costos de producción y el estimado de inversiones; finalmente se desarrolla una evaluación marginal del proyecto.

Los principales resultados y conclusiones de este trabajo indican que:

- i. El procesamiento de la PBat se desarrolla en base a las operaciones: Estrujado, Mezclado con fundentes, Briqueteado de ladrillos y, opcionalmente, Secado de briquetas. El estrujado de la PBat virgen consiste en una pre compresión del material inicial, a una presión máxima de unos 30 kg/cm<sup>2</sup>, para lograr hasta un 8% de humedad (en base húmeda). El proceso de mezclado y dosificación de fundentes y aglomerante, en un mezclador continuo de alta energía, consiste en agregar a la PBat estrujada los fundentes: carbón, fierro, ceniza de soda y aglomerante; para producir el material que va al horno. El proceso de briqueteado del material mezclado comprende una operación de moldeado, en una maquina ladrillera convencional, a una presión máxima de unos 20 kg/cm<sup>2</sup>. El secado de las briquetas se vislumbra como una operación opcional de terminación del proceso, con temperaturas no superiores a unos 120°C y velocidades superficiales del orden de 1 m/s. Respecto a los aglomerantes indagados, se aprecian buenos resultados con la adición de cal; tanto en escala de laboratorio como en escala productiva.
- ii. El análisis de riesgos tecnológicos del proceso revela que si bien las operaciones unitarias son complejas y de control multi-variable, todos las operaciones exploradas experimentalmente se pueden desarrollar con equipos de tecnologías conocidas, los equipos tienen disponibilidad en el mercado internacional y es factible controlar las etapas y subprocesos cruciales; de manera de asegurar que existen vías de solución a los problemas y conflictos que el proceso posee *per se*.
- iii. El análisis de la factibilidad económica muestra que se requiere una inversión de unos \$161.298.850 para desarrollar la línea de procesamiento, incluyendo equipos e instalaciones. El proceso genera reducciones de costos fijos y costos variables del orden del 47% con respecto a la operación actual, con lo cual la evaluación marginal del proyecto a 10 años tiene un VAN al 12% de \$1.772.986.567, una TIR de 236% y una recuperación de la inversión al primer año de implementar las mejoras tecnológicas.
- iv. Con estos resultados se concluye que el proyecto en general es factible técnica y económicamente.
- v. Una importante conclusión del análisis inventivo del proceso desarrollado revela que la tecnología posee gran mérito innovador, de modo que se ha decidido proceder a solicitar una patente de invención para proteger comercialmente los resultados obtenidos.

## Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Objetivos .....	3
3.	Antecedentes .....	4
3.1	Reciclaje de plomo [3, 4].....	4
3.1.1	Aspectos Metalúrgicos.....	4
3.1.2	Procesamiento de baterías .....	6
3.2	Proceso de Briqueteado y Aglomeración [5].....	8
3.2.1	Clasificación de aglomerantes.....	9
3.2.2	Métodos de granulación de aglomerantes .....	9
3.3	Proceso de secado [6 - 11].....	10
3.4	Estado Actual de la planta [12,13].....	15
4.	Metodología.....	19
4.1	Ensayos de definición de procesos .....	20
4.1.1	Caracterización de la materia prima.....	20
4.1.2	Mezclado.....	24
4.1.3	Briqueteado .....	27
4.1.4	Compactación .....	27
4.1.5	Secado .....	32
4.2	Evaluación de la trabajabilidad de la PBat .....	36
4.3	Ensayos de determinación de ligante .....	37
4.4	Ensayos de briqueteado en escala productiva .....	39
5.	Resultados.....	41
5.1	Ensayos de definición de procesos .....	41
5.1.1	Caracterización de la materia prima.....	41
5.1.2	Mezclado.....	45
5.1.3	Briqueteado .....	46
5.1.4	Compactación .....	47
5.1.5	Secado .....	51
5.2	Trabajabilidad de la PBat .....	61
5.3	Ensayos para determinación de ligante.....	62

5.4	Ensayos de briqueteado en escala productiva .....	66
5.5.	Diseño General de la Planta .....	71
5.6.	Especificación de Procesos.....	75
6.	Evaluación de Pre-factibilidad de la línea de procesos.....	76
6.1	Factibilidad Técnica de la unidad.....	76
6.2	Consideraciones para la Factibilidad Económica de la unidad.....	77
6.3	Resultados de la evaluación de Factibilidad Económica de la unidad .....	80
7.	Conclusiones.....	83
	Bibliografía.....	85
	Anexos .....	87

# 1. Introducción

El plomo (Pb) es un elemento químico de número atómico es 82. Es un metal pesado de color plateado con tono azulado, que se oxida para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico y se funde con facilidad. Su densidad es de  $11,35 \text{ g/cm}^3$  y tiene una temperatura de fusión de  $327,5 \text{ °C}$  [1].

El más antiguo artículo conocido hecho en plomo es una estatuilla encontrada en Egipto, que se remonta a unos 4000 años A.C. Aunque como elemento presente en la naturaleza era bien conocido entre los antiguos, sus propiedades no se prestaban para las necesidades inmediatas de ese entonces. Los romanos fueron quienes encontraron su primer nicho, pues su maleabilidad en conjunto con su resistencia a la corrosión lo hizo ideal para tuberías de agua, acueductos y revestimiento de tanques.

En el siglo XXI el plomo sigue siendo un componente fundamental de la sociedad, pero dista de sus primeros usos al conocerse los efectos nocivos para el cuerpo humano durante una exposición prolongada en el tiempo. Si bien su maleabilidad y resistencia a la corrosión son todavía útiles para desagües y revestimientos de techos, el plomo ha avanzado con los siglos, y el aprovechamiento de sus propiedades químicas lo ha transformado en un metal acabadamente moderno.

Por su densidad es apto para la protección de la radiación y es esencial para el personal que trabaja en hospitales, cirugía dental, laboratorios e instalaciones nucleares. También se agregan estabilizantes plúmbicos a plásticos de tipo PVC (Policloruro de Vinilo) para mejorar su durabilidad y el metal protege miles de kilómetros de cables de energía y comunicaciones subacuáticos. Adicionalmente, las baterías de plomo-ácido (BPA) se encuentran a la vanguardia de las tecnologías para almacenamiento de Energía Verde (ecológica), tales como celdas solares y turbinas eólicas. La mayor parte del plomo es usada en arranques de automóviles, camiones, autobuses y motocicletas, y no existe actualmente una alternativa viable.

Más de cinco millones de toneladas de plomo son usadas alrededor del mundo para producir estas baterías. Las BPA empleadas en la actualidad son fácilmente reciclables y no sólo eso, están siendo recicladas en una tasa cercana al 100%.

Se usan BPA para tracción en vehículos eléctricos tales como carretillas elevadoras, son parte integral de los vehículos híbridos, los vehículos actuales y en planeamiento. Además, dichas baterías son vitales como respaldo de energía de emergencia en casos de cortes eléctricos en hospitales, servicios de emergencia, conmutadores telefónicos, redes de telefonía móvil y edificios públicos. Dadas sus propiedades, es difícil encontrar substitutos y actualmente no hay alternativas técnicamente viables para las aplicaciones de las BPA [2].

Este trabajo de título de Ingeniería Mecánica es parte de un proyecto sobre el reciclaje de BPA. En efecto, a partir de las BPA se tienen que separar los agentes ácidos (medio de transferencia de carga) del contenido de la batería y por procesos como trituración y separación física, en celdas de flotación, se genera la materia prima rica en plomo.

Se aborda el desarrollo de una novel tecnología para la valorización de los residuos plomados a través del briqueteado de la pasta de baterías (PBat) con la finalidad de mejorar la eficiencia y calidad del proceso productivo actualmente en operación.

Una briqueta es un bloque sólido, compacto, manipulable y de apropiadas propiedades mecánicas para transporte y que permite, en este caso, la obtención de plomo metálico.

El briqueteado por moldeo es un proceso de compactación, en el cual se somete al material de trabajo una compresión determinada en un molde abierto. Por un lado hay pérdida de humedad por escurrimiento directo del líquido (debe ser evacuado de manera adecuada) y, según su composición, se genera un sólido de dimensiones predeterminadas por el molde que contiene al material de trabajo. Su producto es, por lo tanto, un conjunto de briquetas.

La motivación del trabajo está centrada principalmente en el desarrollo de un método de procesamiento limpio del material plomado dentro de la unidad productiva actual, el cual considera el manejo en planta, transporte y/o almacenamiento de la materia de trabajo. En particular, la generación de un producto compacto y que no se desgrana durante su manipulación, o bien por la acción del ambiente, trayendo el principal beneficio de evitar la generación de polvo de material plúmbico. Este elemento es altamente contaminante y genera impacto en forma directa a las personas que trabajan manipulando el material.

Este método de procesamiento del material plomado corresponde a una innovación en la industria de reciclaje del plomo metálico. Esta nueva tecnología está en curso de patentarse, con el fin de mantener en reserva aspectos que se abordan en este trabajo.

Por otro lado, también se considera la opción de utilizar calor residual de un proceso paralelo de la instalación principal, como fuente de calor auxiliar para realizar el secado o el proceso de curado (también consolidación) de las briquetas producidas.

## 2. Objetivos

El objetivo general del proyecto es el diseño básico de una planta de briqueteado y secado (B-S) a partir de residuos plomados.

Los objetivos específicos son:

- i. Desarrollar el diseño conceptual que define los equipos principales de la instalación.
- ii. Desarrollar el diseño básico para determinar las especificaciones de los procesos involucrados.
- iii. Efectuar estudios de factibilidad técnico-económica de la unidad.

Los alcances del trabajo se limitan a la subsección de la línea de producción comprendida en manejo de materiales desde que comienza el estrujado hasta el briqueteado y secado.

### 3. Antecedentes

En esta sección se describen los antecedentes que permiten la comprensión del proceso de reciclaje de material plomado, así como los antecedentes técnicos de las tecnologías involucradas en el briqueteado y secado de sólidos.

#### 3.1 Reciclaje de plomo [3, 4]

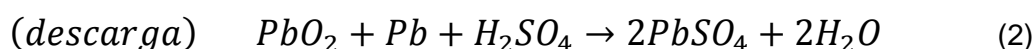
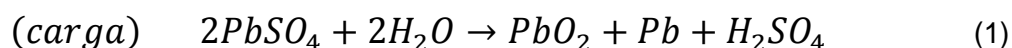
Las BPA se consideran baterías secundarias o acumuladores, puesto que son recargables. Las principales aplicaciones de las baterías son de arranque y en equipos industriales, proporcionando grandes cantidades de energía (por ejemplo, arranque de motor de un automóvil, operar vehículos eléctricos, como medio de almacenamiento de energía para aplicaciones de energía solar, como fuente de energía de emergencia a corto plazo, etc.).

Entre distintas las baterías empleadas se incluyen las baterías de automóvil, de carros y vehículos menores, de sistemas de alimentación ininterrumpida, baterías de maquinaria industrial, baterías de motocicletas, y otras baterías comerciales. Pueden ser normales de plomo-ácido, selladas de plomo-ácido, de tipo gel, o de matriz absorbente. Éstas se reciclan trozándolas, neutralizando su ácido, y separando los polímeros del plomo. Los materiales recuperados se usan para diversos fines, incluyendo la fabricación de baterías y pilas nuevas.

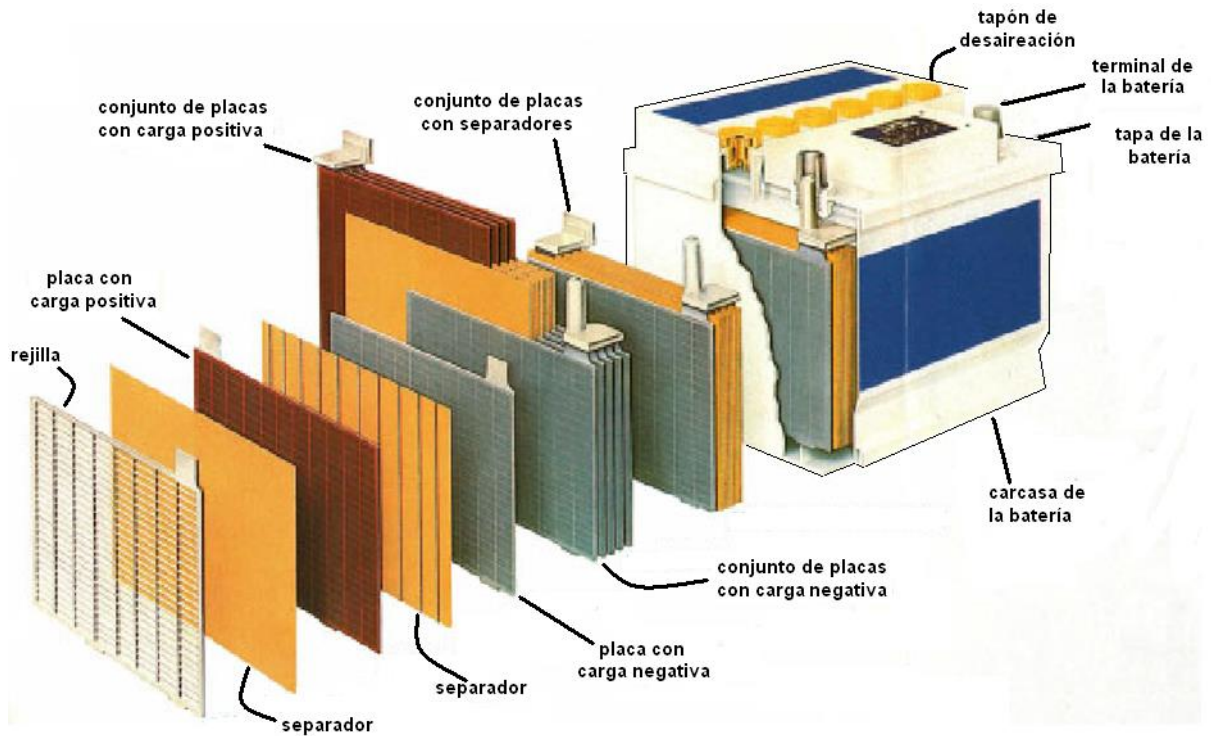
En los últimos años, la producción de BPA ha experimentado un crecimiento importante a nivel mundial, enfocándose principalmente en el acelerado desarrollo de la industria y producción automotriz. Es por esto que, en países desarrollados, las regulaciones han ido implementando exigencias sobre la recuperación de plomo como estándar ambiental para productores e industrias de alto consumo.

##### 3.1.1 Aspectos Metalúrgicos

La figura 3.1 muestra la configuración típica de una batería de arranque. Dentro de los componentes principales de dichas baterías está la carcasa de polipropileno, las placas de separación y aislación de PVC, rejillas (a base de Antimonio (Sb) o Cobre (Cu)), los conectores y la pasta compuesta de plomo metálico, óxido de plomo y sulfato de plomo. En ella ocurren reacciones electroquímicas de carga/descarga según muestran las ecuaciones (1) y (2):







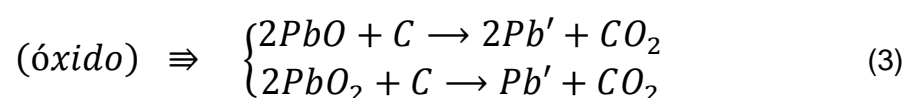
**Figura 3.1: Configuración típica de una BPA.**

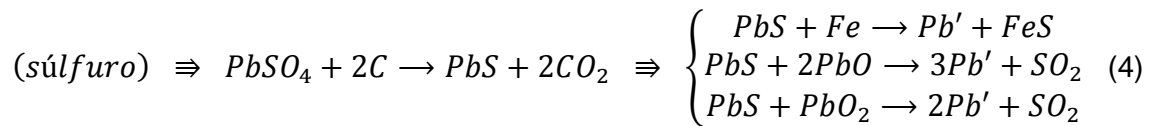
La recuperación del plomo de los acumuladores usados puede tomar dos rutas básicas. Cualquiera de los componentes de los acumuladores como el plomo, el plástico, el ácido, etc., son separados y luego se procesan de forma individual, o bien el ácido se extrae primero y las pilas se procesan como un todo.

En el primer caso, los materiales de reciclaje que pueden recuperarse son todos los componentes de una batería. En el segundo caso, se recupera el plomo y parcialmente también el ácido residual de batería.

En los países en desarrollo donde se han establecido instalaciones de reciclaje industrial, se emplean muchas técnicas manuales debido a la mano de obra barata. Las baterías están a menudo divididas, vaciadas, separadas y son cargadas a mano en los hornos de conversión. El plomo extraído se refina en fundición y se moldea manualmente en lingotes. En general, esto configura un peligro potencial para los trabajadores, la población del entorno y el medio ambiente principalmente la tierra, el suelo y los recursos hídricos en general.

El plomo separado de las rejillas y terminales se puede fundir directamente. Los óxidos y sulfuros de plomo tienen que pasar por procesos metalúrgicos para obtener plomo metálico (Pb'). Las reacciones de reducción que se realizan son las especificadas en (3) y (4):





Tales reacciones químicas consideran reacciones intermedias y simultáneas. Se requieren hornos de alta temperatura (900-1.200°C) y fundentes como Carbono (C) y Hierro (Fe). Las impurezas se recogen gracias a la adición de ceniza de soda (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) que permite la formación de escoria. El producto de la operación de fundición es plomo crudo a refinar y la escoria de sodio como residuo.

Dado que la escoria de sodio es soluble en agua y por tanto peligrosa, se trata de utilizar escorias de sílice que es insoluble en agua. Se requiere, sin embargo, una temperatura de funcionamiento del horno de aproximadamente 1.400°C.

La refinación de plomo crudo se lleva a cabo en un horno a temperaturas que varían entre 400 y 550°C. Si sólo se utilizan desechos de baterías para la producción de plomo, se requieren dos etapas de refinación posteriores:

- i. Eliminación de Cobre (Cu) que podrían haber entrado en el material, a través de cables u otros elementos de la batería.
- ii. Eliminación de Antimonio (Sb) que conforma la rejilla metálica de separación para producir plomo puro.

La eliminación de cobre se realiza con la adición de Azufre (S) elemental, el Antimonio (Sb) se puede eliminar por oxidación selectiva o mediante la adición de nitrato de sodio (NaNO<sub>3</sub>). El plomo contenido en el horno se agita y las impurezas son extraídas de la masa fundida por espumado de la escoria generada. El éxito de la refinación tiene que ser controlado principalmente por análisis químico. El metal refinado se somete a una etapa de colada en lingotes para venta, o bien, elaboración de productos derivados.

### 3.1.2 Procesamiento de baterías

La figura 3.2 presenta el esquema estándar de una planta de reciclaje a base de BPA.

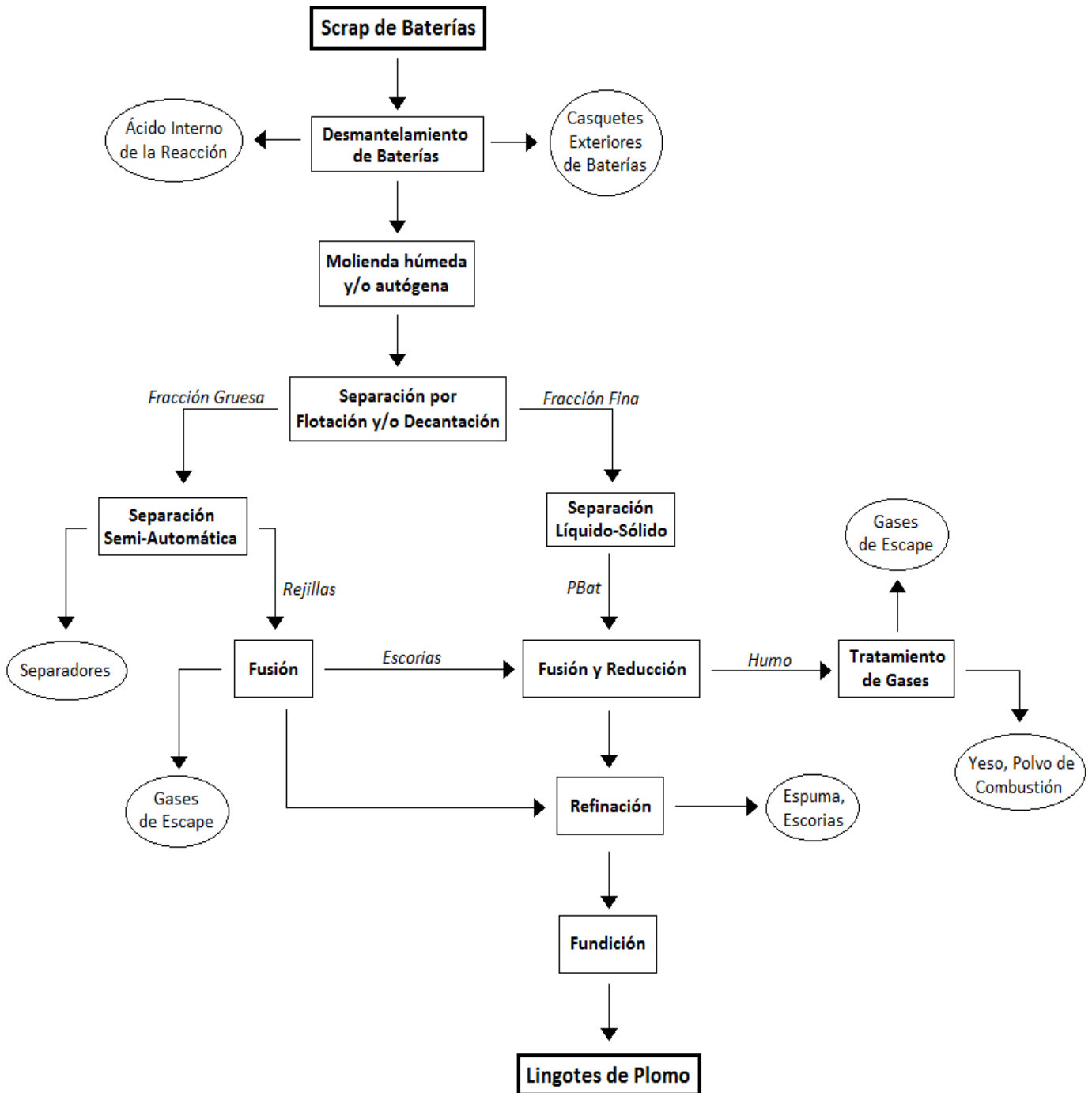
En general, el procesamiento de baterías consta de etapas esenciales de separación de componentes según se indican a continuación:

- i. Molienda o trituración de elementos de interés,
- ii. Separación manual o física (por flotación o precipitación).

Tales tareas son estandarizadas tanto en la gestión de material, así como en la composición del producto final para que pueda ser comercializado. Por lo mismo, para los procedimientos y tecnologías específicas existen variantes en la implementación de dicho procesamiento.

Las baterías usadas son vaciadas a mano y el ácido se recoge en contenedores. La mantención de dichos recipientes permite que impurezas sólidas se

depositen en el fondo por sedimentación natural o con la adición de floculante. El ácido purificado se puede comercializar. El lodo restante de la batería se neutraliza con cal. Al filtrarse el lodo puede ser cargado junto con la fracción fina de pasta plúmbica al horno de reducción.



**Figura 3.2: Diagrama de flujo de una planta de reciclaje de plomo semi-mecanizada.**

En un paso siguiente, las partes de las baterías sin ácido se cortan, pican y pasan a un tambor de molienda autógena, giratoria y en presencia de agua que separa las rejillas de los separadores y de la pasta de las rejillas. Las partículas finas se separan y se dejan llevar por el agua. Se añade un poco de cal al agua para neutralizar las soluciones ácidas y evitar la corrosión masiva del tambor. Otra forma es triturar las baterías en un molino de martillo, las que se alimentan a un tambor de molienda/flotación para la separación.

En ambos casos, la suspensión se bombea de forma continua o discontinua (de acuerdo a las capacidades y flujos) a los tanques de sedimentación; donde se depositan los sólidos en la parte inferior. El líquido clarificado se devuelve de nuevo a la operación de molienda, mientras que el lodo en el fondo de los tanques se hace pasar por filtros o se deja secar al sol. Luego se lleva a la alimentación principal para la fusión y operación de reducción que produce plomo metálico de alta pureza.

La segunda fracción que corresponde al material grueso (básicamente rejillas y separadores) sale del tambor de molienda por su extremo inferior. Los separadores y grillas contenidas en esa fracción se clasifican de manera manual y se movilizan utilizando correas de transporte.

La fracción de metal es la alimentación principal de baja temperatura y otros elementos como cubiertas con los polos unidos, puentes y partes de la red restantes repiten el proceso de molienda, donde se separan los sólidos y el lodo. Los componentes de plástico deben ser descartados con la menor presencia posible de elementos nocivos para el ambiente.

### **3.2 Proceso de Briqueteado y Aglomeración [5]**

El briqueteado es un proceso de compactación, mediante la aplicación de presión, sobre materiales principalmente granulares que experimentan una aglomeración por vía física directa y una reducción de volumen del sólido entrante. Los productos del proceso son sólidos compactos de alta densidad denominados briquetas, las que no se desarmen o disgregan frente a manipulación o condiciones ambientales determinadas.

Los compactados iniciales pueden ser briquetas convencionales (ladrillos, cilindros de distintas dimensiones y razones de aspecto), briquetas en forma de bastón o placas lisas o corrugadas continuas.

Dentro de la maquinaria ampliamente comercializada, se aplica compresión a través de prensas, ya sea por placas o cilindros de compactación en moldes ó cámaras cerradas. Otra opción es trabajar con rodillos de compresión en moldes abiertos, donde se permite con facilidad la fluencia del material de trabajo a lo largo de la línea de proceso (continuidad de flujo).

Cuando las briquetas se hacen sin aglutinantes, el proceso depende de la trituración o de la deformación plástica de las partículas para aproximarlas al máximo y generar la densificación. Las briquetas hechas con aglutinantes son generalmente prensadas a baja presión.

### 3.2.1 Clasificación de aglomerantes

Dentro de los principales tipos de aglomerantes, se identifican:

i. Aglutinantes del tipo matriz que engastan las partículas en una fase aglutinante sustancialmente continua. Por lo tanto, las propiedades de las briquetas se determinan en gran parte por las propiedades del aglutinante. Se reconocen el hidróxido de calcio con melaza y el silicato de sodio pre-tratado con dióxido de carbono.

ii. Aglutinantes del tipo película, que son pegamentos, cuyo mecanismo de consolidación generalmente depende de la evaporación del agua o de un solvente para desarrollar su resistencia. En este grupo cabe el asfalto y el cemento Portland.

iii. Aglutinantes del tipo solvente se usan algunas veces, aunque el material pueda ser briqueteado solamente con presión; ya que pueden utilizarse bajas presiones y briquetas que resulten con una estructura porosa.

iv. Aglutinantes químicos pueden ser tanto del tipo película o del tipo matriz. Los aglutinantes químicos usados para arenas de fundición son buenos ejemplos de aglutinantes del tipo película. Algunos ejemplos son el silicato de sodio y los lignosulfonatos en general.

### 3.2.2 Métodos de granulación de aglomerantes

La utilización de aglomerantes requiere una calificación y clasificación acerca de los métodos de granulación que se desarrollan al incluirlos en la mezcla. Se pueden dividir en dos tipos:

i. Granulación en seco: Las partículas de polvo se adhieren a alta presión. Existen dos procesos principales: los polvos son comprimidos en una prensa ("slugging") o el polvo se comprime entre dos rodillos para producir una lámina del material de interés.

ii. Granulación húmeda: La granulación en húmedo consiste en la masificación de una mezcla de partículas de polvo seco utilizando un fluido. El fluido contiene un disolvente que debe ser volátil de modo que pueda ser removido por secado. La granulación húmeda se puede utilizar sola, o más bien por lo general, con un disolvente que contiene un adhesivo disuelto (aglutinante o agente de unión) que se utiliza para asegurar la adhesión de las partículas una vez que el gránulo está seco. En el método de granulación húmeda tradicional, la masa húmeda generada es forzada a través de un tamiz para producir gránulos que posteriormente se secan.

Los mecanismos de formación de pellets (o gránulos) son esencialmente dos:

i. Mecanismos de unión de partículas. Los gránulos se unen con enlaces formados entre partículas de polvo para que se adhieran y estos enlaces deben ser lo suficientemente fuertes para evitar la ruptura del gránulo de polvo en las operaciones posteriores. Los mecanismos de enlaces entre las partículas son:

a) Fuerzas de adhesión y cohesión en las películas líquidas inmóviles.

- b) Fuerzas interfaciales en películas líquidas móviles.
- c) Puentes sólidos vía fusión parcial, aglutinantes de endurecimiento y la cristalización de sustancias disueltas.
- d) Las fuerzas de atracción entre las partículas sólidas.

ii. Mecanismos de formación de los gránulos. En los métodos en seco, se produce a través del prensado o compresión de una lámina que es más grande que el tamaño de los gránulos requeridos y, por lo tanto, el tamaño final puede ser alcanzado por molienda y tamizado. En los métodos de granulación en húmedo, el líquido añadido tiene que ser distribuido a través de la agitación mecánica generada mientras se granula. El mecanismo de granulación consiste en tres etapas:

- a) Una nucleación por contacto partícula-partícula y su adhesión es debida a los puentes (enlaces) establecidos en el medio líquido.
- b) Una transición donde los núcleos se forman de nuevo por la agitación del granulador.
- c) El crecimiento de los gránulos.

La adición de fundentes y aglomerantes permite una caracterización de la mezcla, la cual puede tener distintas respuestas frente al briqueteado. La factibilidad de que la briqueta generada no se desarme y que en el proceso pierda humedad, determina las condiciones de operación asociadas a los niveles de presión aplicables, así como una consolidación térmica (curado) de las briquetas en presencia de dichos aglomerantes para mantener la geometría y peso final del producto.

### **3.3 Proceso de secado [6 - 11]**

El tratamiento de las briquetas está centrado en la gestión de la humedad. La idea es que la carga entrante al horno de refinación contenga una cantidad reducida de humedad, de modo que el gasto energético empleado en dicho equipo se reduzca y pueda tenerse un control (ya sea en transporte y/o almacenamiento) más próximo a un estado seco, práctico para el proceso.

Se tiene en cuenta que el establecimiento de los parámetros de procesos está dado por rangos de valores que se tienen que ir fijando según las condiciones proyectadas de diseño. Es por esto que la mayor parte de antecedentes requeridos tienen que afianzarse con la realización de ensayos que permitan generar condiciones en ambiente controlado. Esto ocurre con la determinación y caracterización de los materiales y a partir de esto, los procesos de la línea de producción.

En términos generales, el secado se define como la remoción parcial o total de la humedad contenida en una sustancia con la acción principal de un medio térmico a través del intercambio de masa y/o energía.

En términos de procesos, se concibe como uno de las etapas fundamentales de transporte, conservación y almacenamiento de sustancias para distintos propósitos a nivel industrial y prácticas de laboratorio.

El sólido al ser sometido a una corriente de aire y/o a un ambiente con una temperatura mayor que la del sólido en cuestión, frente a una exposición del sólido a un lapso temporal ( $\tau$ ) suficientemente desarrollado, el sólido adquiere un contenido de humedad fijo y definido. Se define como el peso anhidro o de equilibrio cuando se ha eliminado la humedad libre hasta tener una masa constante  $w_a$ .

La humedad relaciona la cantidad de líquido presente en el sólido. A partir de esto, en el contexto de este trabajo se define la humedad en base húmeda ( $H_{BH}$ ) y base seca ( $H_{BS}$ ) según las ecuaciones (5) y (6) respectivamente:

$$H_{BH} = \frac{\Delta w}{w_o} = \frac{w_t - w_{t+1}}{w_o} \quad (5)$$

$$H_{BS} = \frac{\Delta w}{w_a} = \frac{w_t - w_a}{w_a} \equiv X \quad (6)$$

Con  $w_o$  el peso inicial de la briqueta y  $w_t$  el peso de la briqueta registrado en el tiempo  $t$ .

La acción principal del secado apunta a la reducción de la humedad. En el caso del secado convectivo se combina el efecto de la imposición de un flujo que pasa a una velocidad determinada y una temperatura específica. Dicha reducción de humedad se refleja de manera directa en una pérdida de peso ( $\Delta w$ ) de cada briqueta a lo largo del tiempo.

Los valores característicos ( $w_a$ ,  $\tau$ ) representan los parámetros nominales que se pueden establecer en procedimientos experimentales, según las condiciones impuestas para los ensayos de secado anhidro. Esto es, secado en horno sin convección y sometiendo al sólido húmedo a una temperatura definida hasta alcanzar el estado de equilibrio.

Además, se considera la velocidad de secado que reporta el modo de realización del proceso, la cual se puede especificar si es en base húmeda ( $v_h$ ) o seca ( $v_s$ ) según el tipo de humedad que se utilice. Esta velocidad está dada por la ecuación (7):

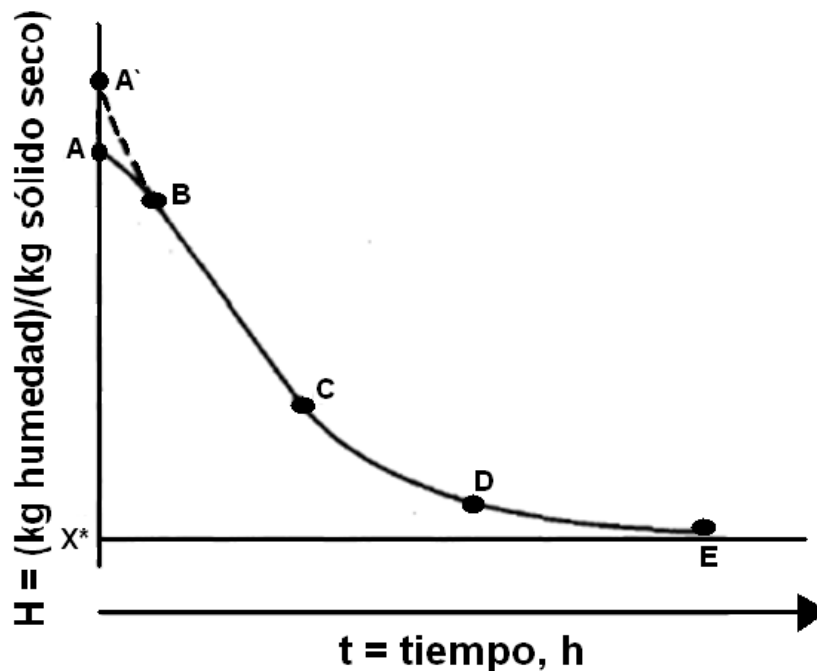
$$v = \frac{1}{H} * \frac{dH}{dt} \quad (7)$$

El flujo o rapidez de secado ( $N$ ) viene dado por:

$$N = -w_o * \frac{dH}{dt} * \frac{1}{A_T} \quad (8)$$

Donde la humedad es considerada en base seca y  $A_T$  es el área superficial de transporte de humedad [7].

Las figuras 3.3 y 3.4 respectivamente muestran las curvas representativas de operaciones de secado, donde se aprecia la evolución del peso inicial hacia el peso anhidro y la rapidez de secado.



**Figura 3.3: Curva general de un proceso de secado [7].**

Entre ambos estados, se reconoce un peso crítico que marca un cambio en los mecanismos de secado según la transferencia de masa y calor desde el compacto:

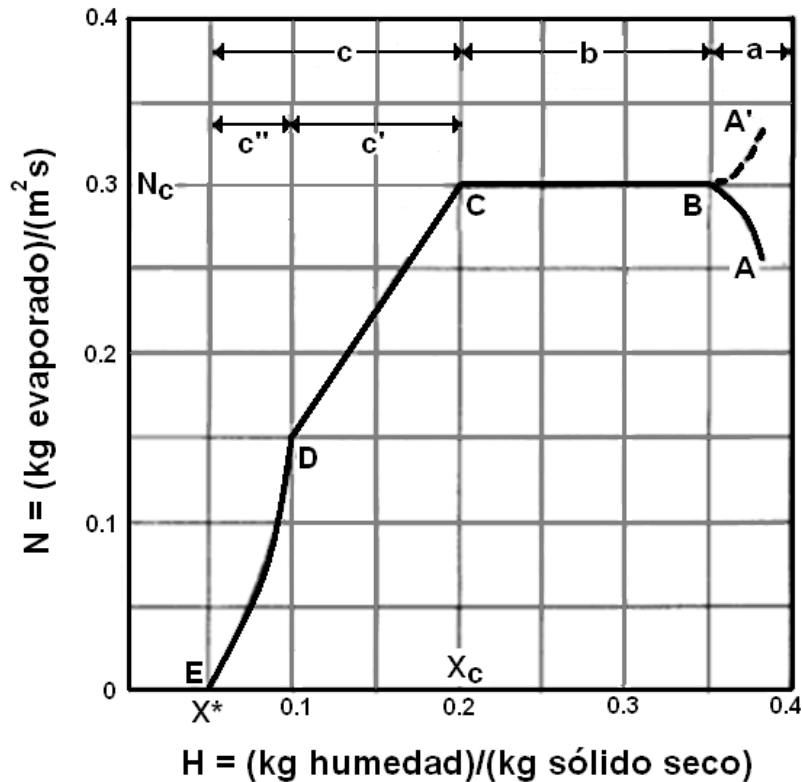
i. El primer proceso corresponde al momento en que se llega a un equilibrio entre las propiedades (temperatura y humedad) superficiales del sólido y del ambiente próximo a éste (sección a de la figura 3.4).

Al principio, la superficie sólida y la líquida están generalmente más frías que la temperatura superficial final; la rapidez de la evaporación aumenta cuando la temperatura superficial aumenta hasta su valor final durante el tramo AB. En forma alternativa, la temperatura en equilibrio puede ser menor que el valor inicial, lo cual da lugar a la curva A'B mientras ocurre el ajuste inicial.

ii. El segundo proceso guarda relación con el establecimiento de la velocidad de secado constante por la evaporación de la humedad no ligada en la superficie del sólido. Cuando se observa este fenómeno, es en este tramo donde se caracteriza el secado al sólido dadas las condiciones aplicadas a través de la rapidez de secado  $N_c$  (sección b de la figura 3.4).

iii. El tercer proceso corresponde a un decaimiento de la velocidad de secado (sección c de la figura 3.4) dado principalmente por el transporte de la humedad interna y/o retenida en poros o paredes granulares en el interior del material, reflejado en el secado de la superficie no saturada (sección c') y en el movimiento interno de los controles de humedad (sección c'').





**Figura 3.4: Curva típica de velocidad de secado [7].**

El secado convectivo se basa en la extracción de humedad de un sólido por medio de la circulación de aire a cierta velocidad y temperatura. Los aspectos que se buscan para propiciar esta forma de secado son alta una superficie por unidad de volumen, la transferencia de calor por unidad de superficie y la transferencia de masa de agua evaporada a través de capas límite (de acuerdo a la composición y caracterización de las briquetas) y extracción del vapor con aire a baja humedad relativa.

El secado por convección de sólidos humedecidos varía según el criterio e implementación de la extracción de calor, ya sea según un ritmo por lotes o continuo, o bien, por el método de calefacción empleado [7]:

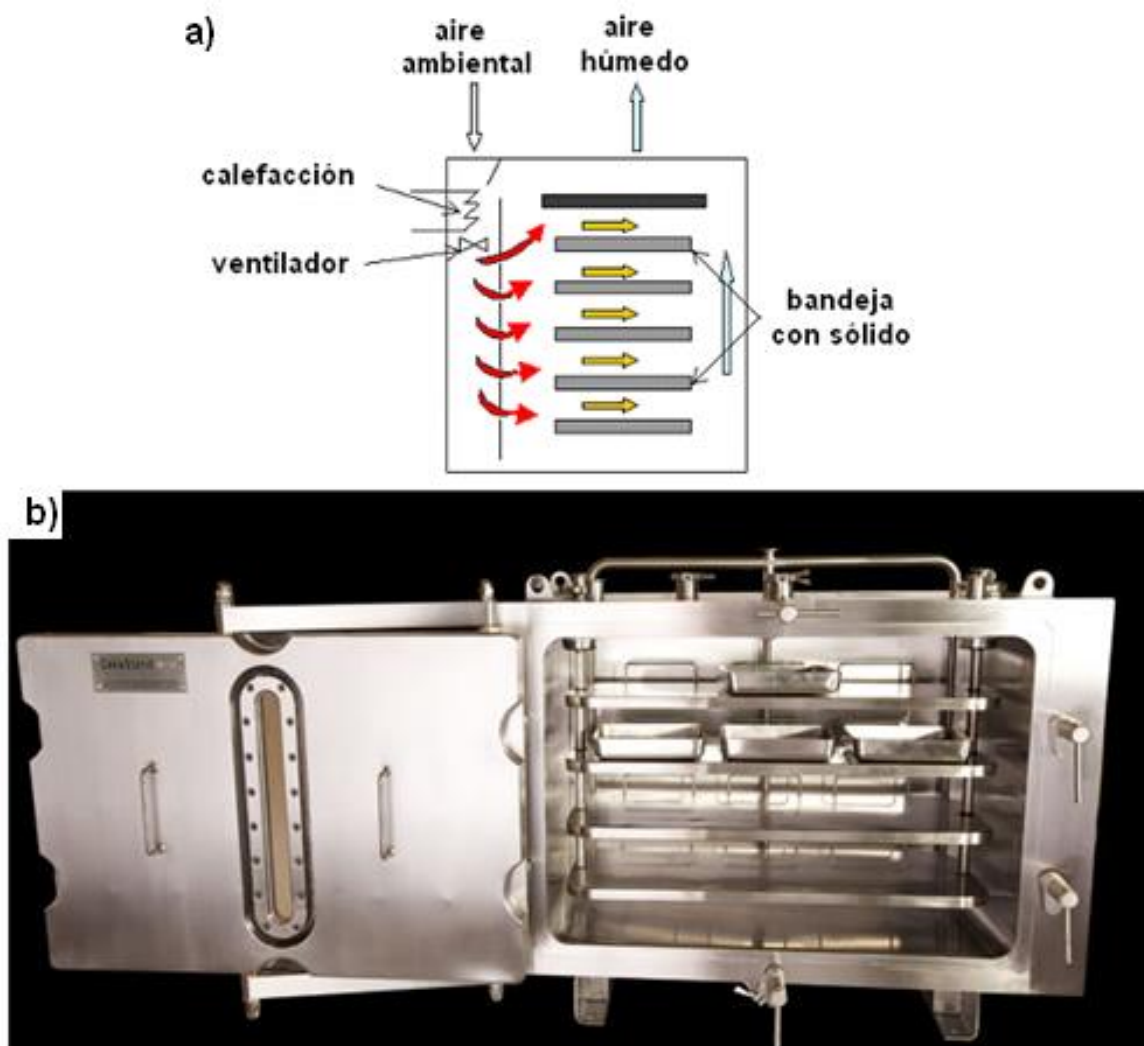
i. Medio directo: El aire cercano al sólido capta la humedad, preferentemente en circulación, como secadores de lecho fluidizado, secadores de aspersion, secadores de túnel y de bandejas.

ii. Medio indirecto: Por conducción a un material metálico o radiación térmica externa, como secadores de bandejas vibratorias o secadores rotatorios de tubo de vapor.

A continuación se mencionan algunos métodos tradicionales de secado convectivo:

i. Secadores de bandeja y de túnel, con las siguientes características: producción discontinua, regulación automática del secado de un producto por el control de la velocidad del medio que desplaza los sólidos, instalación de un sistema de medición de la humedad y temperatura del producto en puntos del secadero. La figura 3.5.a muestra un esquema sencillo de un secador de bandeja, con su ejemplo comercial en 3.5.b.

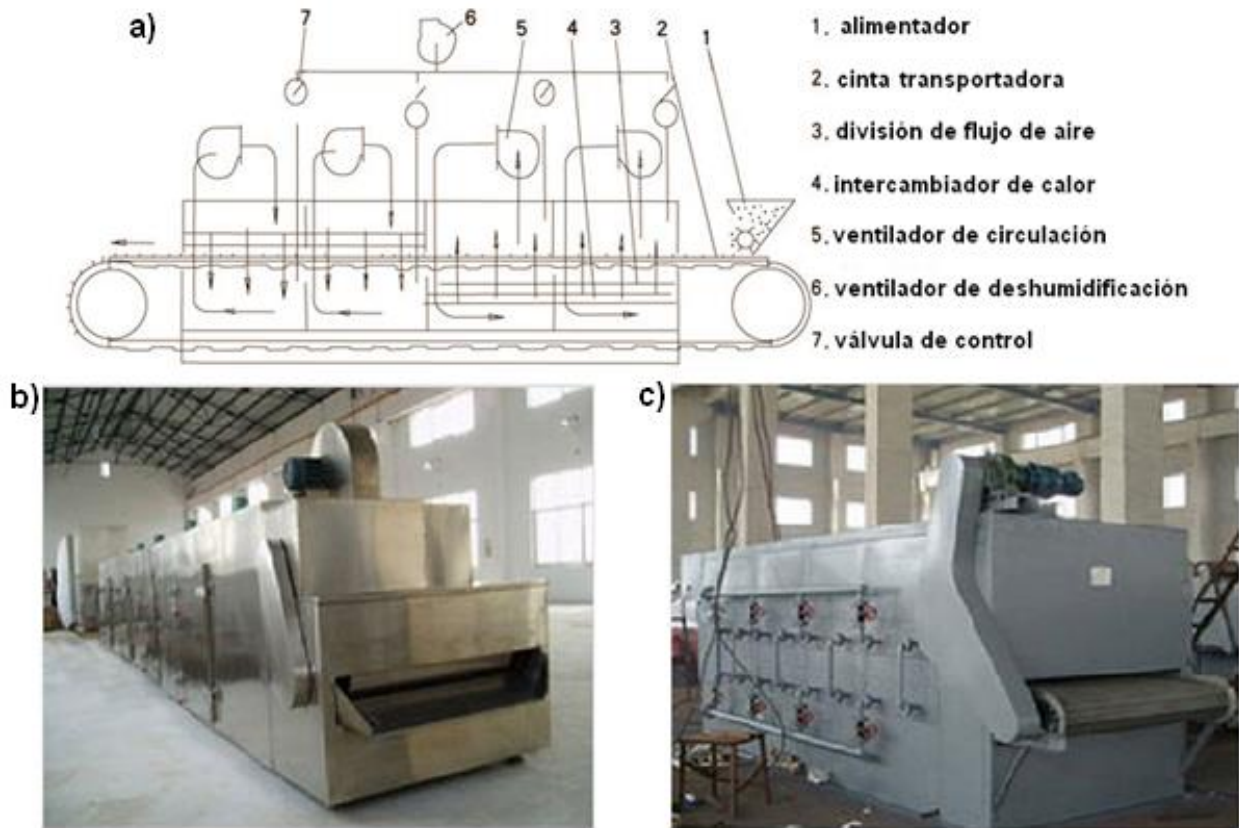
Se implementa un lecho fijo donde el material húmedo se coloca en bandejas poco profundas que descansan en un circuito calefaccionado. No existen movimientos de la partícula, aunque puede moverse la masa total a desecar. Se tiene que aumentar la superficie disminuyendo la superficie de la capa del material a desecar y hacer pasar el flujo de aire a través del material.



**Figura 3.5: Secador de Bandeja: a) Esquema de funcionamiento del secador, b) Secador de bandeja comercial [8, 9].**

ii. Secadores de bandas sin fin donde el material se hace pasar por correas transportadoras en un ambiente con cierta temperatura residual ambiental y un flujo de aire a alta temperatura. La figura 3.6.a muestra un esquema sencillo de un secador de bandas, con un par de ejemplos comerciales (figuras 3.6.b y 3.6.c)

También se implementan lechos móviles si el material a secar es granulado y se hace pasar en contracorriente con un flujo de aire seco y caliente. Otras formas son los cilindros rotatorios de secado que funcionan en tandas productivas continuas.



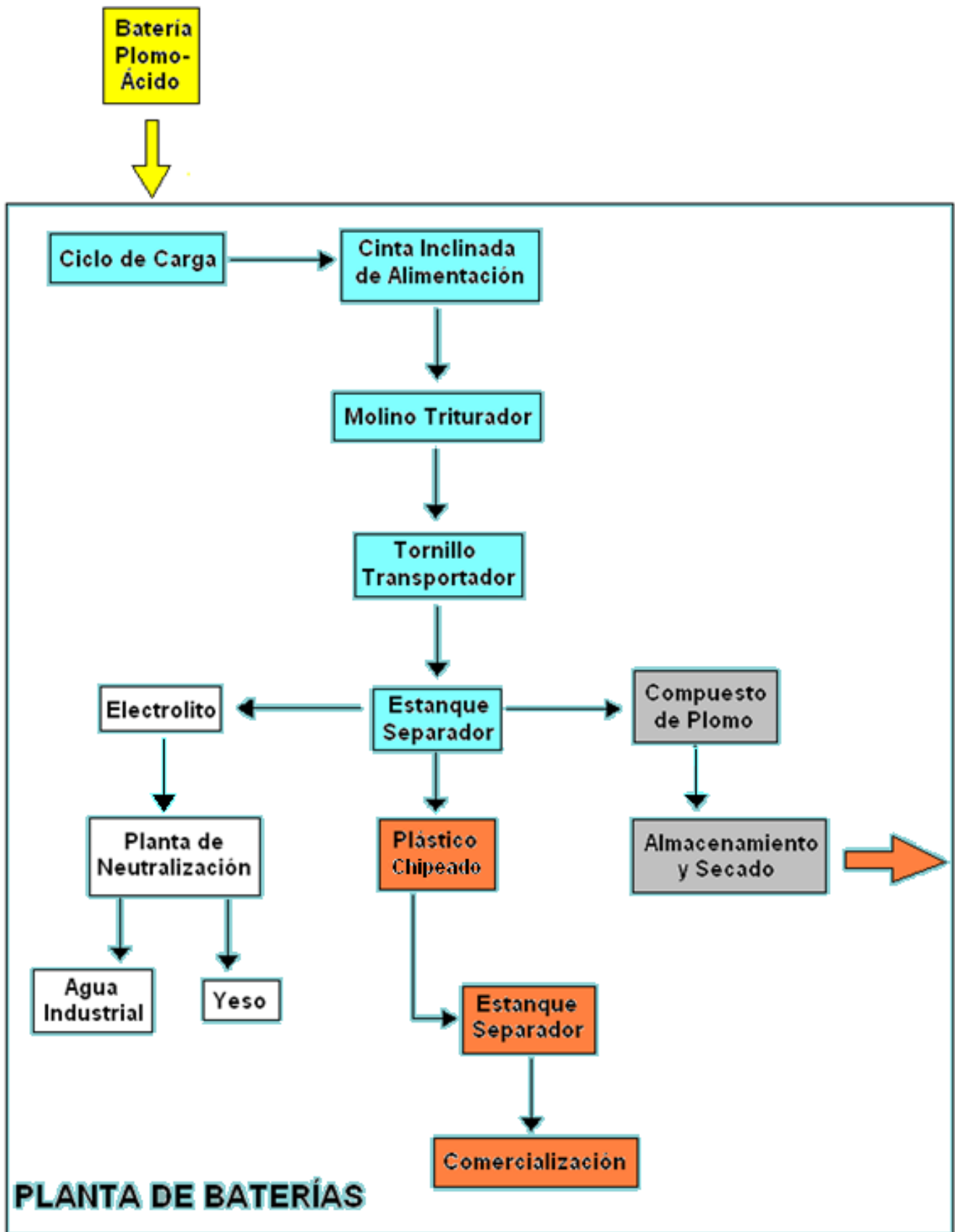
**Figura 3.6: Secador de Bandas: a) Esquema de componentes principales del secador, b) y c) Secadores comerciales de banda [10,11].**

### 3.4 Estado Actual de la planta [12,13]

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran el flow-sheet de la planta de reciclaje de material plomado, secciones distribuidas en el área de baterías propiamente tal y de fundición de metal de plomo. Como parte del proceso al cual se somete el material plomado, luego de estas plantas de procesamiento existe también una sección de electrorefinación posterior a la fundición.

A continuación se describe de manera general el proceso productivo, según la normativa correspondiente [12] y su implementación.

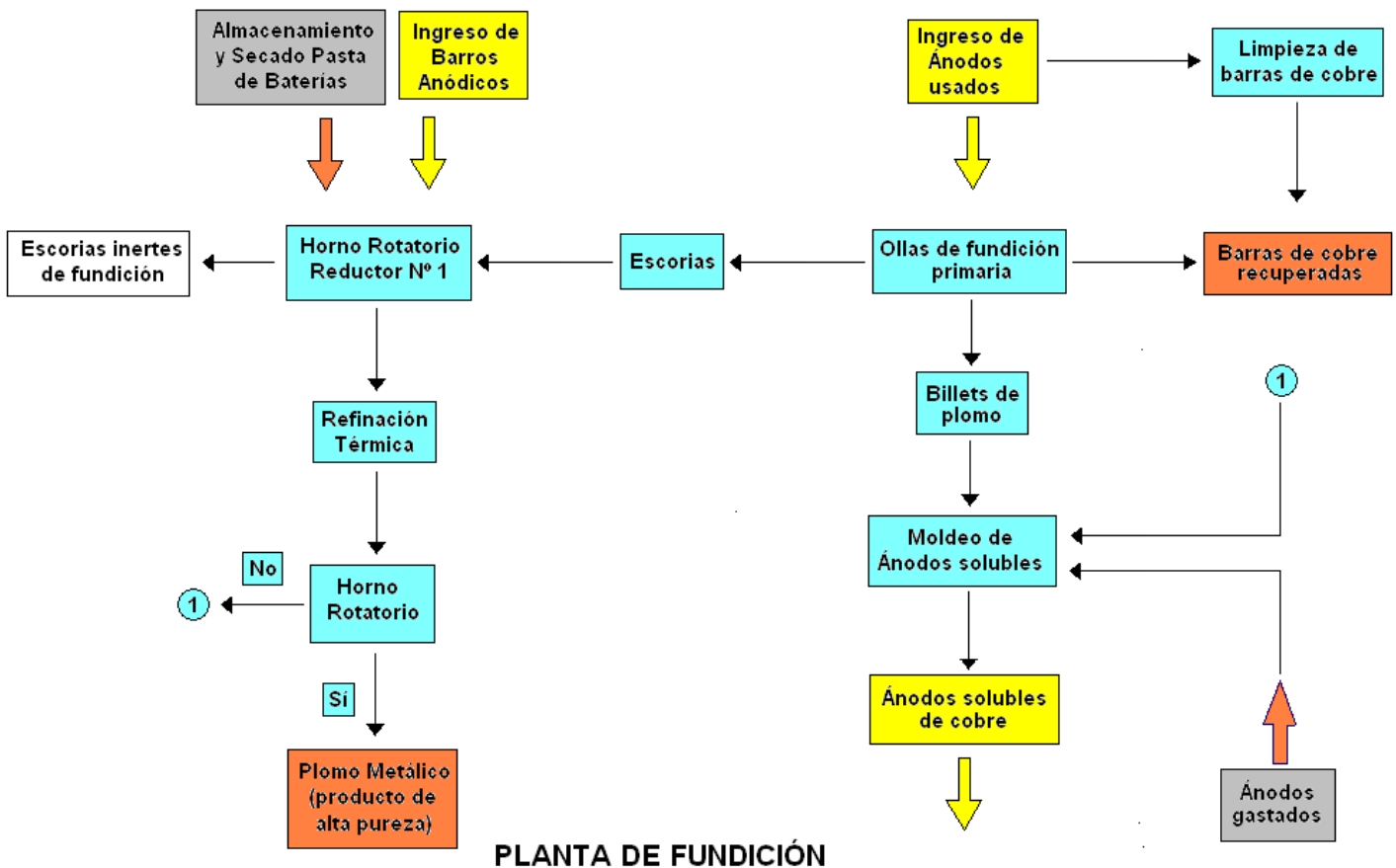
Las fundiciones de plomo secundario producen plomo y aleaciones de plomo a partir de material de chatarra plúmbica. El plomo secundario se obtiene de baterías de vehículos de chatarra y de otras materias primas utilizadas en la fundición secundaria de plomo son los contrapesos de llanta, tuberías, soldaduras, escorias, y revestimientos de plomo.



*Figura 3.7: Diagrama de flujo del reciclaje y procesamiento de las BPA de la planta de baterías [5].*

La fundición secundaria de plomo consiste en tres operaciones principales: pre-tratamiento, fundición y refinación de la chatarra. El pre-tratamiento de la chatarra es la eliminación parcial de los contaminantes metálicos y no metálicos contenidos en la chatarra y en los residuos plúmbicos. Los procesos usados para pre-tratar y preparar la chatarra son troceado, trituración y exudación de la batería. Se vacían y trituran las baterías y luego se separa el plomo de los materiales no metálicos. A continuación, se exuda la chatarra de plomo separada en un horno de reverbero o rotatorio de gas o petróleo para separar el plomo de metales que tienen puntos de fusión más altos.

En la fundición se produce plomo por fusión y separación del plomo de los contaminantes metálicos y no metálicos, reduciendo los óxidos a plomo elemental. La fundición se efectúa en altos hornos, hornos de reverbero y rotatorios. Los materiales de carga utilizados para los altos hornos son chatarra de metal pre-tratada, segunda escoria, chatarra de hierro, coque, escoria reciclada, polvo de combustión y cal. El calor que necesita el proceso para fundir el plomo es producido por la reacción del coque alimentado con el aire inyectado en el horno. En la combustión, parte del coque funde la carga, mientras que el resto reduce los óxidos de plomo a plomo elemental. A medida que la carga de plomo se funde, la cal y el hierro suben a la superficie del baño fundido y forman un fundente que retarda la oxidación del producto de plomo.



**Figura 3.8: Diagrama de flujo del reciclaje y procesamiento de las BPA de la planta de fundición [5].**

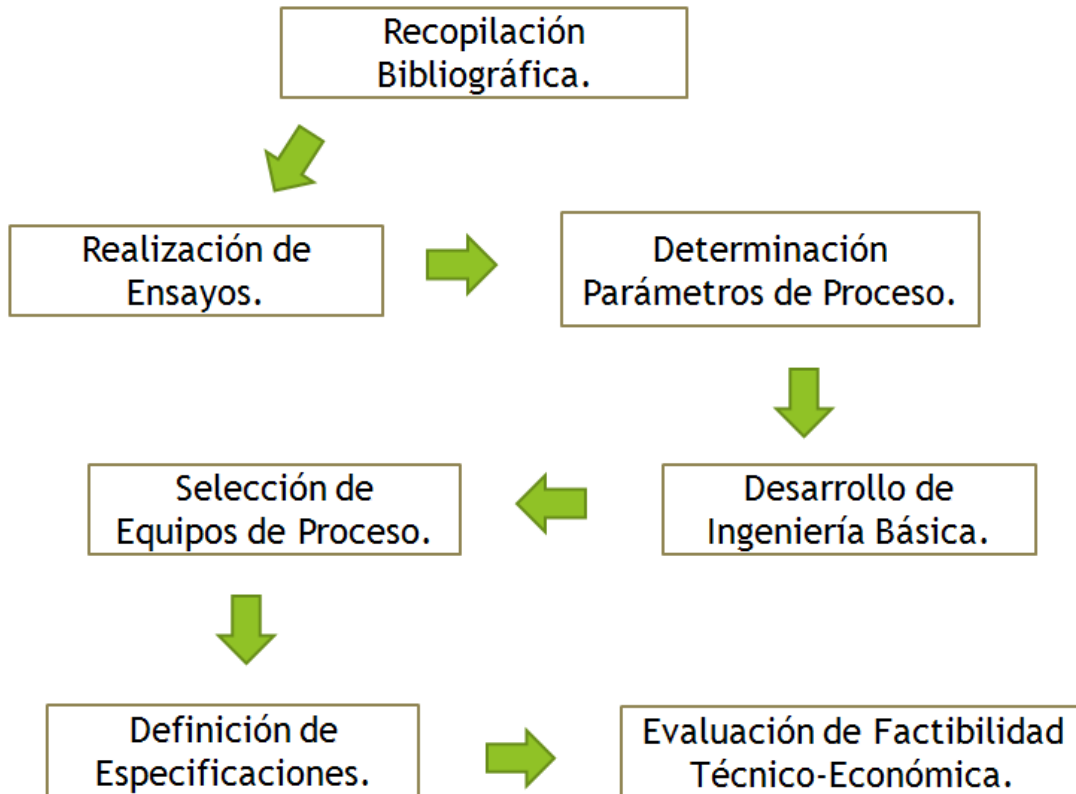
La refinación y colado del plomo crudo proveniente de los hornos de fundición pueden comportar su ablandamiento, aleación, y oxidación, según el grado de pureza o el tipo de aleación deseada. Estas operaciones pueden realizarse en hornos de reverbero; sin embargo, es más común que se utilicen hornos de tipo olla. Los hornos de aleación sólo funden y mezclan lingotes de plomo y materiales de aleación. Los materiales de aleación más comunes son el antimonio, estaño, arsénico, cobre y níquel. Los hornos de oxidación, sean unidades tipo crisol o de reverbero, son usados para oxidar el plomo y arrastrar los óxidos de plomo producido a la corriente de aire de combustión para su posterior recuperación en filtros de manga de alta eficiencia.

El contexto del trabajo corresponde al tratamiento de PBat, previa a la planta de fundición indicada en la figura 3.8. Se estima que el desarrollo planteado tiene mérito innovador y que puede ser patentado como un novedoso proceso de tratamiento de la pasta BPA para producir plomo metálico centrado en la gestión de humedad presente en el material procesado. De este modo, se reducen los impactos negativos asociados a la contaminación y al traslado y/o almacenamiento del material a base de plomo.

Los procesos de producción están secuenciados en el pre-tratamiento de materiales, el acopio y almacenamiento de material, la fundición propiamente tal y la refinación del metal recuperado (con la denominación plomo Bullion).

## 4. Metodología

En la figura 4.1 se presenta un esquema de la metodología que se emplea en el proyecto. Para alcanzar los objetivos considera el desarrollo de ensayos para tener el sustento experimental necesario para la determinación de los parámetros del proceso, en particular, la determinación de un diseño conceptual de la instalación. Con esto, se puede considerar el rango disponible de equipos principales a emplear en la línea de proceso.



**Figura 4.1: Esquema de metodología a desarrollar.**

A partir del esquema anterior se plantean los elementos a desarrollar para abordar el diseño conceptual de la línea de procesos y, a partir de esto, los equipos principales:

- i. Recopilación bibliográfica y de antecedentes.
- ii. Realización de ensayos preliminares.

En esta sección se identifican los primeros ensayos necesarios para el establecimiento de parámetros y variables de interés en los siguientes procesos:

- a. Mezclado de compontes.
- b. Briqueteado de mezclas.

- c. Compactación de briquetas.
- d. Secado de briquetas.

Los detalles de cada caso se presentan en el capítulo 4.1.

- iii. Definición general de la línea de procesos, que apunta a materializar los avances parciales de los ensayos realizados para establecer los equipos principales.

Para desarrollar diseño básico se busca determinar las especificaciones de procesos a través de ensayos de caracterización de materiales, generación y consolidación de briquetas, para definir de manera precisa y acotada los parámetros de procesos a aplicar. Para esto, en el capítulo 4.2 se realizan ensayos de trabajabilidad de la PBat, en 4.3 se establece la metodología con que se determina el ligante a utilizar en la configuración de la briqueta y finalmente considerar el desarrollo de ensayos en escala productiva en la sección 4.4.

Finalmente se efectúa el estudio de factibilidad técnico-económica de la unidad considerando los aportes de equipos principales y materias primas. Los equipos principales apuntan a la solución del problema de gestión de humedad presente en las briquetas y consideran indicadores económicos respecto a costos y ahorros por régimen de producción.

## **4.1 Ensayos de definición de procesos**

A continuación se detallan la metodología para cada uno de los ensayos realizados en este trabajo.

### **4.1.1 Caracterización de la materia prima**

#### **i. Densidad**

Se considera analizar la densidad aparente del material y ver cuán trabajable es por sí solo, dada las experiencias de escurrimiento de agua que se presentan en su manipulación.

En una pipeta de 1000 ml de capacidad (precisión de  $\pm 10$  ml) se vacían 200, 400, 600 y 1000 ml y se pesa el contenido de la pipeta en cada caso, en una balanza de precisión  $\pm 2$  g.

Para cada nivel se registra el peso correspondiente, para luego tomar una densidad aparente promedio. Para homologar el procedimiento, se consideraron también todos los componentes iniciales de las briquetas.

#### **ii. Ángulo de reposo**

Dentro de las consideraciones para la caracterización de los materiales, se tiene que tener una referencia de la disposición en reposo de los componentes de la briqueta para su dosificación. A partir del procedimiento de Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders (Método de ensayo



estándar para medir el ángulo de reposo de polvos en moldeo por flujo libre) de la ASTM Internacional (Designation: C 1444 – 00) se realizó el siguiente procedimiento:

1. Obtener una muestra al menos 454 g (1 lb), que sea representativa y homogénea y situarla en un contenedor con un 30% a 50% más que la muestra.
2. Medir el diámetro interno del cono, cuyo diámetro de salida (d) debe oscilar entre 6,4 y 9,4 mm (0,25 y 0,38 in) y para una capacidad de material de carga entre 113,5 y 227,2 g (0.25 y 0.5 lb) respectivamente.
3. Instalar la estructura para sostener el cono, fijando la altura a la base empleando un cartón de separación respecto al nivel de caída de 3,81 cm (H). La figura 4.2 muestra el montaje realizado.
4. Asegurar la salida del cono para evitar escurrimiento y llenar con el material hasta el tope.



**Figura 4.2: Montaje para ensayo de ángulo de reposo.**

5. Retirar el tapón del cono y seguir vertiendo material a aproximadamente a la misma tasa en que este cae desde el cono, hasta que el tope del material tope con la boca del cono, como se muestra en la figura 5.1.
6. Medir en 4 puntos el diámetro del montículo considerando la partícula más lejana no más allá de 13 mm de la base del cono. El diámetro resultante de las pruebas será el promedio de estos 4 puntos considerados ( $D_A$ ).
7. Devolver el material al contenedor inicial, revolver y repetir desde el punto 1 hasta obtener 3 muestras del diámetro.
8. Para las tres muestras obtenidas, calcular el ángulo de reposo  $\theta_0$ , con la ecuación (9) del procedimiento de la ASTM ya especificada y que viene dada por:

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left[ \frac{2*H}{(D_A-d)} \right] \quad (9)$$

9. Registrar los valores de diámetros medidos de las boquillas y conos generados.

iii. Granulometría [14 - 16]

Para la caracterización granulométrica de los materiales de interés, se emplean los procedimientos establecidos en las siguientes normas: NCh 164.EOF 1976: Áridos para morteros y hormigones - extracción y preparación de muestras y NCh 165.Of 2009: Áridos para morteros y hormigones - tamizado y determinación de la granulometría.

Los principales parámetros y respuestas derivados de estos ensayos son:

- Módulo de finura (MF): Corresponde a la centésima parte de la suma de los porcentajes acumulados retenidos en los tamices de la serie preferida o estándar de acuerdo a la normativa a la que se aplica el ensayo. Se tiene que precisar que normativas como el uso recomendado para el análisis de suelos, la constitución de áridos u hormigones son los principales marcos regulatorios para su respectiva aplicación.

- Porcentaje acumulado que pasa por un tamiz: Porcentaje en masa de todas las partículas (granos) de menor tamaño que la abertura de un determinado tamiz. Se calcula como la diferencia entre el 100% y el porcentaje acumulado retenido en ese tamiz.

- Porcentaje acumulado retenido en un tamiz: Porcentaje en masa de todas las partículas (granos) de mayor tamaño que la abertura de un determinado tamiz. Se calcula como la suma del porcentaje parcial retenido en ese tamiz más todos los porcentajes parciales retenidos en los tamices de mayor abertura.

- Porcentaje parcial retenido en un tamiz: Porcentaje en masa correspondiente a la fracción directamente retenida en un determinado tamiz.

A continuación se resume el método de ensayo empleado en este proyecto. Una muestra de árido seco de masa conocida (se mide previamente) es separada por medio de una serie de tamices de cuyas aberturas van progresivamente afinando el tamaño (como los que se detallan en la tabla 4.1), para poder determinar la distribución de tamaño de las partículas. Se tiene que determinar los porcentajes parciales retenidos del material y expresar las granulometrías en función del porcentaje en peso que pasa por los tamices.

Se calcula la masa total o suma de las fracciones retenidas en todos los tamices y en el recipiente receptor, la que no debe diferir con la masa de la muestra de ensayo en más de 3% para las arenas y de 0,5% para las gravas. En caso que no se cumpla este requisito se rechaza el ensayo y se debe repetir con una muestra gemela. Luego, se calcula el porcentaje parcial retenido en cada tamiz y en el recipiente receptor, referido a la masa total de las fracciones retenidas, aproximando al 1 %. Finalmente se expresa la granulometría como el porcentaje acumulado que pasa, en el que se indica como primer resultado el del menor tamiz en que pasa el 100% y como último resultado, el del primer tamiz en que pasa el 0%.

Respecto de la balanza utilizada, debe tener una capacidad superior a la masa de la muestra más la del recipiente para masar y una precisión mayor o igual que 0,1% de la masa de las fracciones a ensayar, ya sea para el árido fino o para el árido grueso.

Los tamices son de alambre y abertura cuadrada, de tamaños nominales según se indica en las tablas 4.1, sobre la serie ASTM D422 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, 2007, (para el análisis del tamaño de partículas) y la tabla 4.2 sobre tamaños de apertura de malla de acuerdo a la serie que se establece en el procedimiento. Los tamices de la serie preferida son de valor doble o la mitad a partir del tamiz básico de 5 mm que separa el material en árido grueso y árido fino. Es necesario hacer notar que la serie preferida no es extensamente usada mientras no se fabriquen los tejidos de alambre de esas precisas aberturas.

**Tabla 4.1: Serie de tamices ASTM D422.**

Número	Abertura	Número	Abertura	Número	Abertura	Número	Abertura
5"	127,00	0,875"	22,23	8	2,360	80	0,180
4,24"	107,70	0,75"	19,05	10	2,000	100	0,150
4"	101,60	0,625"	15,88	12	1,700	120	0,125
3,5"	88,90	0,53"	13,46	14	1,400	140	0,106
3,25"	82,55	0,5"	12,70	16	1,180	170	0,090
3"	76,20	0,4375"	11,11	18	1,000	200	0,075
2,5"	63,50	0,375"	9,53	20	0,850	230	0,065
2,12"	53,85	0,3125"	7,94	25	0,710	270	0,053
2"	50,80	0,265"	6,73	30	0,600	325	0,041
1,75"	44,45	0,25"	6,35	35	0,500	400	0,035
1,5"	38,10	4	4,75	40	0,430	450	0,031
1,25"	31,75	5	4,00	50	0,360	500	0,028
1,06"	26,92	6	3,35	60	0,250	635	0,021
1"	25,40	7	2,80	70	0,212		

El acondicionamiento y tamaño de la muestra de ensayo establecido en la NCh. 164.E OF 1976 se detalla que la muestra de laboratorio se homogeneiza cuidadosamente en estado húmedo y se reduce, por cuarteo, para obtener en estado seco un tamaño ligeramente superior a los valores que se indican. No se permite hacer la reducción en estado seco ni tampoco reducir a una masa exacta predeterminada. Luego la muestra se seca hasta masa constante en estufa u horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 4.2: Tamaños nominales de apertura de mallas [15].**

<b>Serie Preferida (mm)</b>	<b>Serie Complementaria (mm)</b>	<b>Serie Provisoria (mm)</b>
-	125	-
-	100	-
80	-	75
-	63	-
-	50	-
40	-	38,1
-	31,5	-
-	25	-
20	-	19
-	16	-
-	12,5	-
10	-	9,5
-	8	-
-	6,3	-
5	-	4,75
2,5	-	2,36
1,25	-	1,18
0,63	-	0,6
0,315	-	0,3
0,16	-	0,15

#### **4.1.2 Mezclado**

El ensayo tiene como objetivo determinar la consistencia de la mezcla plúmbica. El método consiste en medir la disminución de altura que experimenta un tronco de cono de mezcla plúmbica fresca, de medidas y elaboración estandarizada (base mayor 20 cm, base menor 10 cm y altura 30 cm), cuando éste se deja libre. A mayor disminución de altura, menor consistencia de la mezcla.

El fundamento de este ensayo se refleja en la NCh1019: Determinación de la Docilidad – Método del cono de Abrams. En el contexto del grado de trabajabilidad que se pueda alcanzar con las mezclas, se indica que el ensayo de consistencia de una muestra se efectúa dos veces, de manera que el resultado corresponde al cálculo del promedio de las dos determinaciones. La consistencia puede estar definida por tipo o por asentamiento. Si se ha definido por tipo la mediana tiene que estar dentro del intervalo siguiente:

**Tabla 4.3: Consistencia por tipo.**

Tipo de consistencia	Tolerancia (cm)	Intervalo Resultado
Seca	0	0 a 2
Plástica	±1	2 a 5
Blanda	±1	5 a 10
Fluida	±2	10 a 17

Si la consistencia se ha definido por su asentamiento, la mediana de los dos valores tiene que estar dentro de unos valores según se indica la tabla 4.4:

**Tabla 4.4: Consistencia por asentamiento.**

Asentamiento (cm)	Tolerancia (cm)	Intervalo Resultante
Entre 0 - 2	± 1	A± 1
Entre 3 - 7	± 2	A± 2
Entre 8 - 12	± 3	A ± 3

En primera instancia se pretende determinar el procedimiento óptimo en la dosificación de materiales a fin de determinar el orden más apropiado y lograr una mezcla homogénea y adecuada para lograr la fabricación de briquetas que se ajusten a los requerimientos del proceso.

Este ensayo se realiza con un mezclador de alimentación eléctrica de 50 L de capacidad y según los órdenes establecidos en la tabla 4.5 se incorporan los elementos que se han considerado como componentes de la mezcla (dadas directamente por la planta) y en las tablas 4.6 y 4.7 se especifica la dosificación respecto a los fundentes y adición extra de agua respectivamente según corresponda.

**Tabla 4.5: Orden de mezcla de materiales.**

Muestras / Ensayo	O1	O2	O3	O4	O5	O6
Pasta de baterías	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Borras anódicas	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Pasta de Pb	1°	1°	1°	1°	1°	1°
Carbón	2°	2°	2°	4°	2°	4°
Viruta de fierro	3°	3°	3°	5°	3°	5°
Pasto Seco	4°	4°	5°	3°	5°	3°
Silicato de Sodio	5°	5°	6°	6°	6°	6°
Ceniza de soda	-	6°	-	-	7°	7°
Agua	-	-	4°	2°	4°	2°

La posterior identificación de las mezclas obtenidas corresponde a la numeración establecida, esto es, al referirse a una mezcla O1D1 significa que la composición se realiza según la dosificación D1 en el orden O1 establecido en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7.

Los materiales considerados en la dosificación se agrupan en:

i. Materia prima, la que considera inicialmente la PBat y borras anódicas, que en conjunto constituyen la PBat en esta sección de ensayos.

ii. Fundentes, los cuales permiten la obtención de plomo metálico bajo las condiciones establecidas en el capítulo 3.1 y que corresponden al carbón, viruta de hierro y ceniza de soda.

iii. Se utiliza pasto seco para facilitar el transporte de humedad alojada en el centro de la briqueta.

iv. Como aglomerante se utiliza el silicato de sodio, que permite la consolidación de la briqueta.

En virtud de los resultados obtenidos se pretende caracterizar la trabajabilidad de la mezcla y la posibilidad de manipularla, en función de su consistencia.

**Tabla 4.6: Dosificaciones de las mezclas.**

Dosificación	D1		D2		D3		D4		D5		D6	
	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]
Pasta de Pb	77,66	11,40	70,86	10,58	78,61	11,40	74,40	11,18	70,49	10,58	70,72	10,58
Carbón	8,86	1,30	8,71	1,30	8,96	1,30	8,65	1,30	8,66	1,30	8,69	1,30
Fierro	7,49	1,10	7,37	1,10	7,59	1,10	7,32	1,10	7,33	1,10	7,35	1,10
Pasto Seco	0,89	0,13	1,00	0,15	0,69	0,10	1,60	0,24	0,53	0,08	1,20	0,18
Silicato de Sodio	5,11	0,75	10,05	1,50	4,15	0,60	8,03	1,21	5,00	0,75	8,02	1,20
Ceniza de Soda	0,00	0,00	2,01	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	7,99	1,20	4,01	0,60
Total Mezcla	100,00	14,68	100,00	14,93	100,00	14,50	100,00	15,03	100,00	15,01	100,00	14,96

**Tabla 4.7: Adición de Agua en la formulación.**

Dosificación	D1		D2		D3		D4		D5		D6	
	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]
Agua	7,56	1,20	8,01	1,30	6,45	1,00	21,02	4,00	8,20	1,34	13,38	2,31
Mezcla base Plúmbica	92,44	14,68	91,99	14,93	93,55	14,50	78,98	15,03	91,80	15,01	86,62	14,96
Total Mezcla Hidratada	100,00	15,88	100,00	16,23	100,00	15,50	100,00	19,03	100,00	16,35	100,00	17,27

### 4.1.3 Briquetado

A través de los ensayos de preparación de briquetas, para 3 tamaños de molde, se busca evaluar las respuestas y comportamiento de cada mezcla plúmbica elaborada en la etapa anterior para diferentes dosificaciones de fundentes y reactivos. La finalidad de lo anterior es evaluar y definir la mejor alternativa desde el punto de vista de la trabajabilidad (o la facilidad para manipulación) en la obtención de briquetas, principalmente en la mantención de la forma otorgada por los moldes.

Los moldes utilizados se muestran en la figura 4.3 y tienen los siguientes tamaños:

- $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$ .
- $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ .
- $100 \times 100 \times 35 \text{ mm}^3$ .



**Figura 4.3: Moldes para briquetas de sección cuadrada.**

### 4.1.4 Compactación

#### i. Briquetas con Compactación.

Se realizan ensayos donde las mezclas establecidas en los puntos anteriores se someten a compresión antes de secarlas, para analizar si la compresión disminuye el tiempo de secado. El molde empleado se muestra en la figura 4.4. El diámetro de las muestras utilizando este molde es de 8,1 cm e inicialmente no se especifica una determinada altura de briqueta, aunque sí se toma la referencia la cantidad de carga

(en kg) desde 0,5 a 1,4 kg (como máximo admisible para 12 cm de altura final) y se analiza su comportamiento final de consolidación.

Esto tiene el fin de estudiar y constatar el aporte de la compresión en la disminución del tiempo de secado y su firmeza ante la manipulación y transporte.



**Figura 4.4: Molde para briquetas cilíndricas.**



**a)**



**b)**



**c)**

**Figura 4.5: Compactación del material de trabajo: a) mezcla plúmbica; b) la prensa utilizada; c) inicio de compactación en matriz metálica.**

En la figura 4.5 se aprecia en una primera instancia (a) la mezcla antes de ser comprimida, en la imagen (b) se aprecia la prensa utilizada para comprimir las muestras, finalmente en la imagen (c) se puede ver como es compactada una de las muestras.



## ii. Compactación de PBat Virgen.

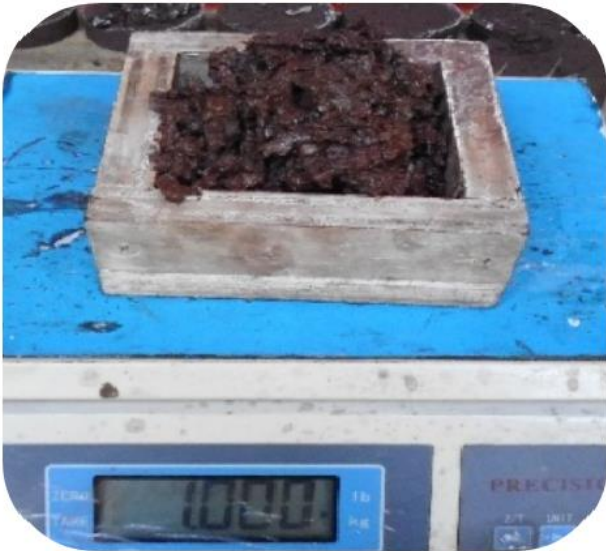
Otro enfoque que se aborda es compactar la PBat antes de mezclarla con el resto de los elementos. Lo anterior tiene el objetivo de escurrir la mayor cantidad de agua antes del mezclado y así se analiza y compara la cantidad de agua evacuada en función de la presión necesaria según el escurrimiento de dicha humedad.

El procedimiento de dicha experiencia es el siguiente. Se arman 6 muestras de 1 kg de PBat, las cuales fueron comprimidas a las presiones que aparecen en la tabla 4.8. Durante la compresión se utilizan filtros para poder estimar de mejor manera la pérdida de agua debido a la compresión. Finalmente se registra el peso final y se estima la pérdida de agua, sumando al peso final la masa del material que queda en los filtros.

**Tabla 4.8: Presiones para ensayos de compactación de pasta virgen.**

Número de Muestra	Presión [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	6,5
2	15,5
3	20,7
4	25,8
5	51,6
6	154,9

En la figura 4.6 se aprecia el proceso de compactación de la PBat y los equipos utilizados en los ensayos. En la figura 4.6.a se ve como es pesada la PBat antes de comprimir en la balanza, en la figura 4.6.b se aprecia la compresión de la PBat en prensa manual y cómo escurre el agua de la muestra. En la figura 4.6.c se puede ver el peso de los papeles filtros utilizando para poder estimar la cantidad de PBat escurrida junto con el agua para así poder sumarla a la masa final de la muestra. Finalmente, en la figura 4.6.d se puede observar un detalle de los filtros con los residuos de PBat.



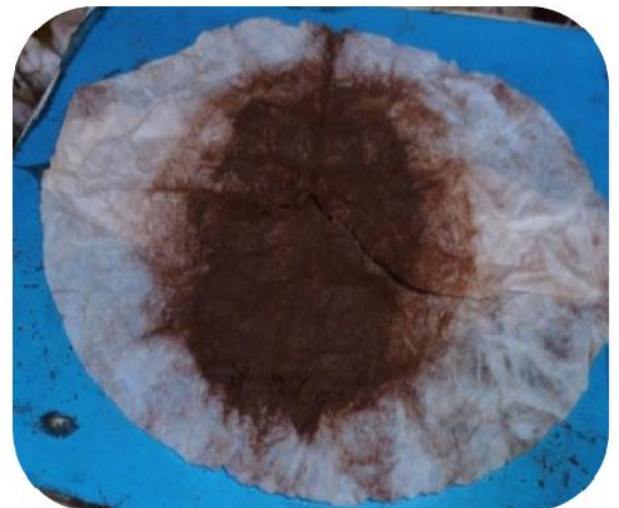
a)



b)



c)



d)

**Figura 4.6: Proceso de compactación de pasta virgen: a) pesaje material de muestras; b) compactación; c) estimación de pérdidas tras compactar; d) filtro con residuos.**

### iii. Compactación de Mezcla O5D5.

Se elaboran muestras de la mezcla que tenía la composición O5D5, que aparece en la tabla 4.9 y el respectivo orden en que se dosificaron dichos elementos. En esta experiencia la PBat se seca utilizando el método del punto anterior (sección 4.1.4.ii.) con una presión de  $20,7 \text{ kg/cm}^2$ . El proceso de mezclado se realiza simulando un mezclador de cuchillas con una pala en un recipiente plástico de manera manual, con un tiempo de mezcla no superior a los 3 min.

**Tabla 4.9: Composición y dosificación de las muestras para ensayos de compactación.**

Orden	Componente	Cantidad [g]
1°	Pasta de Baterías	636
2°	Borras Anódicas	72
3°	Carbón	88
4°	Viruta de Fierro	74
5°	Ceniza de Soda	80
6°	Silicato de Sodio	50
Total		1.000

Los ensayos de briqueteado corresponden a la elaboración de 9 muestras de 250 g cada una, con la mezcla antes mencionada, las cuales fueron comprimidas a las presiones que aparecen en la tabla 4.10.

**Tabla 4.10: Presiones de compactación para generación de briquetas.**

Número de Muestra	Presión de Compactación [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	25,8
2	38,7
3	51,6
4	64,5
5	77,4
6	90,3
7	103,3
8	116,2
9	129,1

En la figura 4.7 algunas de las etapas en el proceso de compactación de la mezcla O5D5. En particular, la figura 4.7.a se aprecia la mezcla cuando es pesada antes de la compactación. Por otro lado, en la figura 4.7.b se puede ver la muestra dentro de la matriz de compactación en la mitad del proceso. Es importante notar que en este proceso no hubo pérdidas de agua en la compactación.



a)



b)

**Figura 4.7: Procesos para mezcla O5D5: a) moldeo de mezcla; b) compactación.**

El objetivo de esta experiencia es analizar la consolidación y solidez de las muestras y verificar si las muestras son capaces de soportar el transporte y la manipulación de las mismas.

#### **4.1.5 Secado**

##### **i. Consideraciones Generales.**

El objetivo principal de esta etapa consiste en encontrar la mejor alternativa para la fabricación de briquetas, considerando aspectos geométricos del tipo de molde especificados en el punto 4.1.2, mezcla óptima y materiales remanentes del proceso a fin de poder optimizar y definir/diseñar los procedimientos y equipos necesarios para las etapas de mezclado, briqueteado y secado.

De acuerdo a lo anterior, los objetivos principales de este análisis consisten en:

a) Determinar el excedente o remanente de material plúmbico en la elaboración de briquetas, esto es: escurrimiento de agua en el proceso de moldeado, generación de polvos/pelusas de material plúmbico, etc.

b) Determinar las dificultades en la fabricación de briquetas para las diversas dosificaciones, a fin de definir/diseñar el procedimiento, tamaño y mezcla óptima.

c) Identificar los requerimientos de energía a escala industrial utilizada en la etapa de briqueteado/extrusión.

A través de los ensayos de preparación de briquetas, para 3 tamaños de molde (especificados en la sección 4.1.3), se busca evaluar las respuestas y el comportamiento de cada mezcla plúmbica elaborada en la etapa anterior para diferentes dosificaciones de fundentes o reactivos y así poder definir la mejor alternativa desde el punto de vista de su trabajabilidad en la obtención de briquetas.

## ii. Secado Anhidro.

El objetivo principal del ensayo de secado anhidro es obtener la densidad de la mezcla plúmbica sin agua libre o de equilibrio. Para cumplir con el objetivo principal, se dispone de un horno eléctrico a una temperatura controlada de 120°C por 60 horas, donde tiene lugar el secado para distintas dosificaciones de mezcla y con distintas geometrías de molde.

De acuerdo a lo anterior, los objetivos principales de este análisis consisten:

a) Determinar el tiempo que tarda cada muestra en alcanzar su condición anhidra, registrando mediciones de peso de la muestra.

b) Encontrar/definir la mezcla, su respectiva consistencia (que indica directamente la trabajabilidad) y tamaño de molde óptimo que permita alcanzar la condición anhidra en el menor tiempo.

c) Observar los fenómenos producidos en las briquetas a raíz del ensayo de secado anhidro. Por ejemplo: generación de polvo o material volátil, endurecimiento, formación de costra exterior, desmoronamiento, resquebrajamiento o agrietamientos, estado en que se encuentra el centro de las briquetas.

## iii. Secado Convectivo.

El objetivo principal del ensayo de secado convectivo consiste en caracterizar el mecanismo de secado de mezclas plúmbicas correspondiente a distintas proporciones/dosificaciones de aditivos/aglomerantes/ligantes, evaluando cómo se comporta el material de trabajo en cada uno de los casos. Para cumplir con el objetivo principal se efectúan 2 grupos de ensayos: secado a máxima velocidad, secado a mínima velocidad. De acuerdo a lo anterior, los objetivos específicos de este análisis son:

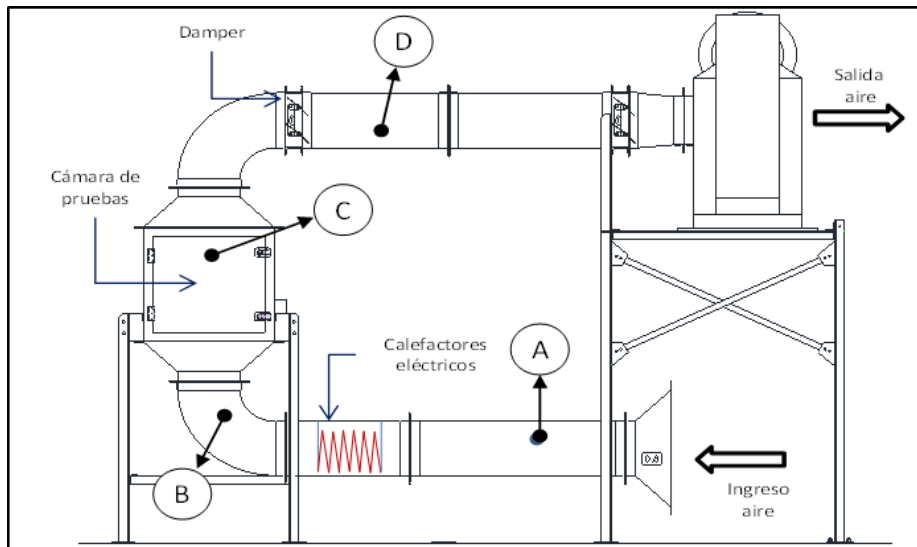
a) Determinar las curvas de secado para las distintas muestras analizadas.

b) Determinar el tiempo de secado óptimo en cada muestra analizada.

c) Observar los fenómenos producidos en las briquetas bajo los ensayos a máxima y mínima velocidad del aire.

d) Determinar los parámetros térmicos de diseño, a fin de poder escalar y realizar el diseño conceptual del equipo de secado requerido para el proceso.

El equipo utilizado para realizar los ensayos de secado convectivo se denomina estufa de secado. Los puntos de control y su ubicación relativa en la estufa de secado son los que se detallan en la figura 4.8.



**Figura 4.8: Estufa de secado convectivo.**

- Punto A: Temperatura y humedad ambiental.
- Punto B: Temperatura aire de secado.
- Punto C: Velocidad de aire en la superficie de la cama de paletas en lecho estático y temperatura superficial de paletas.
- Punto D: Temperatura aire de salida y caudal de aire referencial de proceso.

La estufa de secado consiste en un túnel metálico por el cual se hace circular aire caliente impulsado por ventilador eléctrico. Dicho aire no recircula y pasa a través de las siguientes áreas principales:

a) Ingreso de aire: Zona inicial de admisión de aire, en esta zona se puede variar la humedad relativa del aire de admisión ya sea humectándolo con mallas húmedas o desecándolo con dióxido de silicio (Sílica gel).

b) Calefactores: Zona donde el aire es calentado mediante calefactores eléctricos, el control permite tres niveles de potencia térmica.

c) Cámara de prueba: Espacio donde se ponen las muestras de producto a ensayar, se puede utilizar un lecho rotatorio utilizando un tambor de malla con velocidad angular constante (15 rpm), el que permite una aireación homogénea o en su defecto un lecho estático utilizando confinamiento lateral y malla en su fondo, lo que permite simular las condiciones de secado de los equipos existentes.

d) Dámper: Limitador de flujo de aire, permite establecer las condiciones de aireación requeridas dentro de la cámara de pruebas.

e) Salida de aire: El flujo de aire es inducido por un ventilador centrífugo instalado en el extremo final del circuito de aire.

La metodología utilizada para cumplir los objetivos en ensayos convectivos son los siguientes:

a) Se analizan muestras de material plúmbico, con distintas proporciones y dosificaciones de aglomerantes o ligantes, consolidadas cada una de ellas en briquetas.

b) Se enciende la estufa de secado, manteniéndola un tiempo en operación hasta alcanzar las condiciones de operación requeridas y estables para efectuar los ensayos.

Una vez que se estabilizan y alcanzan las condiciones de operación, se comienza con el ensayo convectivo mediante el control y medición de parámetros relevantes en el desarrollo del ensayo:

- Temperatura y humedad ambiental.
- Temperatura aire de secado.
- Caudal aire promedio de proceso.
- Velocidad de aire en la superficie de la cama de paletas (secado en lecho estático).
- Temperatura superficial de paletas.
- Temperatura aire de salida.

En la figura 4.9.a se aprecia el secador utilizado en las pruebas de secado convectivo. En la figura 4.9.b se muestran 3 de las muestras que se secaron durante los ensayos, en esta imagen se aprecia la disposición típica de las muestras en la bandeja de secado.



a)



b)

**Figura 4.9: Ensayos de secado convectivo: a) estufa calefactora para banco de pruebas; b) muestras de secado en cajón porta-briquetas.**

#### iv. Secado al Aire Libre.

El objetivo principal del ensayo de secado al aire libre es determinar la factibilidad de secar las briquetas frescas recién fabricadas a la intemperie, con el objeto de disminuir los requerimientos energéticos para efectuar un secado convectivo, debido a la pérdida de agua por evaporación (al estar expuestas directamente al sol) o por escurrimiento.

De acuerdo a lo anterior, los principales objetivos específicos de este análisis apuntan a determinar la cantidad óptima de días de secado a la intemperie y observar los fenómenos producidos en las briquetas bajo secado al aire libre.

Otro parámetro de referencia para la caracterización de las briquetas que son producidas es una relación simple de parámetros geométricos, que se ocupa como referencia comparativa es la razón superficie/volumen (SV) en  $\text{cm}^{-1}$ . Para un paralelepípedo de base cuadrada de lado  $a$  y altura  $h$  y un cilindro de radio  $r$  y altura  $h$  es:

$$SV = \begin{cases} \frac{2a^2+4ah}{a^2h} = 2 \left( \frac{1}{h} + \frac{2}{a} \right), & \text{paralelepípedo} \\ \frac{2\pi r^2+2\pi rh}{\pi r^2h} = 2 \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{r} \right), & \text{cilindro} \end{cases} \quad (10)$$

## 4.2 Evaluación de la trabajabilidad de la PBat

A raíz de los ensayos anteriores, se continúa realizando pruebas a consecuencia de cambios realizados en la composición de los materiales base de las briquetas. Dichos cambios son el uso exclusivo de la PBat (sin borras anódicas dentro de la composición), de modo que las briquetas esencialmente se componen del scrap de baterías (BPA procesadas por separación y trituración); además de no incluir el pasto seco como elemento constitutivo de la briqueta, a modo de proporcionar mayor facilidad en el manejo de los materiales.

Es por esto que se realiza una caracterización de PBat mediante su comportamiento en exceso de agua y la capacidad de fluidez de ésta.

Para considerar el comportamiento en presencia de agua, el objetivo principal es realizar un análisis descriptivo y cualitativo de dos condiciones:

i. El material tal como se recibe.

ii. Una carga de 5 kg de PBat en exceso de agua (cantidad suficiente como para cubrir el nivel de pasta reposada presente), la cual es incorporada y mezclada manualmente para distribuir el contenido de manera uniforme.

Dadas las consideraciones de reducción de humedad de la PBat previa a la dosificación para la mezcla, también se somete la PBat a extrusión en estado inicial representativo del escenario de trabajo en planta (composición y condiciones de humedad) y con una cantidad de agua que permitiese diluir la pasta original.



Para esto, se utiliza una matriz cilíndrica de 8 cm de diámetro (mostrada en la figura 4.7.b), dejando un extremo móvil para la aplicación de presión y en la salida se instalan para 2 ensayos distintos, 2 tapas de espesor de 1 cm, con diámetros de salida de 2 cm y 5 cm respectivamente para cada ensayo.

La carga de relleno del molde se fija en 1,2 kg de PBat, lo cual deja un volumen suficiente para que el cilindro punzón de compresión avance los primeros tramos (entre 1 y 2 cm) del molde bien alineado. La carga máxima de dicho molde varía entre 1,5 y 1,7 kg de PBat.

Para aplicar la fuerza de compresión durante la extrusión se emplea una prensa manual de 3,5 ton máxima de capacidad y una carrera de 300 mm, la cual se muestra en la figura 4.5.b.

### **4.3 Ensayos de determinación de ligante**

En conjunto con la variación de la composición original (sin borras anódicas ni pasto seco), se consideran otras variantes de ligantes además del silicato de sodio, esto es; greda, cola fría, cal, bischofita, harina, bentonita y yeso. Esto se debe a que al realizarse pruebas preliminares de configuración de briquetas, el silicato de sodio no otorga suficiente estabilidad en dosificaciones porcentuales menores al 20%.

Además, las búsquedas iniciales de briquetadoras y ladrilleras convencionales aplican una amplia gama de presión efectiva, la que no necesariamente se condice con las primeras fases de los ensayos. Es por esto que se ha querido bajar la incertidumbre respecto a la estabilidad, consolidación y manipulación de las briquetas con la consideración de otros ligantes.

A continuación se detalla la metodología de la serie de ensayos para la determinación de ligante.

Primero se comienza con la preparación de la PBat, esto es, para simular una condición inicial estándar de la materia prima de trabajo y se agrega agua hasta la saturación del material.

#### i. Estrujado.

- a) Llenar el molde de estrujado con 1,4 kg de PBat saturada de agua.
- b) Estrujar la PBat a  $30 \text{ kg/cm}^2$ , en la base de la cabeza de estrujado en molde caracterizado por un diámetro de 8 cm.

#### ii. Desarrollo de la mezcla.

- a) Juntar los materiales de acuerdo a la proporción y orden de la tabla 4.11.
- b) Mezclar hasta conseguir un material homogéneo.

c) Juntar la mezcla inicial con el aglomerante, medir el porcentaje másico de aglomerante respecto a la masa de la mezcla inicial (adición del 5% en peso). Se consideran los siguientes ligantes: Cal, yeso, cola fría, bentonita, harina, greda y silicato de sodio.

d) Mezclar hasta conseguir un material homogéneo.

**Tabla 4.11: Dosificación mezcla base para briquetas de distinto ligante.**

Componente	% en peso
Pasta de Baterías	71,8
Escamilla de Hierro	10,1
Carbono	10,1
Ceniza de Soda	8,0

iii. Briqueteado por moldeo.

a) Verter la mezcla con aglomerante en el molde, presionar a mano. Como no se compacta, se utiliza un plato metálico para verter el contenido.

b) Retirar el molde de la mezcla.

iv. Briqueteado con presión baja.

a) Llenar el molde de briqueteado con la mezcla homogénea. El molde usado corresponde a un perfil cuadrado de sección de 10x10 cm<sup>2</sup>, espesor de 0,25 cm y con un alto de 5 cm.

b) Aplicar 3 y 10 kg/cm<sup>2</sup> de presión a la mezcla.

c) Retirar la briqueta del molde.

La tabla 4.12 especifica el criterio cualitativo de conformidad, resistencia y compacidad de la briqueta generada en una escala descriptiva de 0 a 3, donde el valor 3 corresponde a un resultado positivo y con buenas proyecciones para poder ser probado y/o replicado en un contexto y condiciones más cercanas al desarrollo productivo de las briquetas a base de plomo metálico.

Dicho criterio es una convención adoptada para realizar comparaciones, en un marco experimental objetivo, entre las distintas briquetas producidas según la planificación de ensayos establecida.

**Tabla 4.12: Criterio de conformidad para categorización de briquetas producidas.**

Conformidad [Con]	Descripción
0	Disconforme: No se forma una briqueta estable.
1	Disconforme: Se forma una briqueta, bota mucho polvo, se rompe con la mano.
2	Conforme: Se forma una briqueta, bota poco polvo, se rompe con la mano.
3	Conforme: Se forma una briqueta, bota poco polvo y no se rompe con la mano.

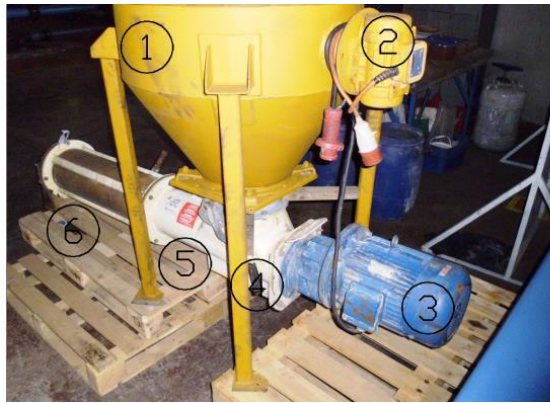
#### **4.4 Ensayos de briqueteado en escala productiva**

El enfoque principal de esta sección es abordar la factibilidad del proceso a desarrollar, a modo de estudio de la situación con tecnología propia del mercado de hormigón. Según sus resultados, puede tenerse una idea fidedigna del potencial que tiene la línea de procesos. Los objetivos específicos de las pruebas son los siguientes:

- i. Comprobar la factibilidad técnica de fabricar briquetas de mezcla de plomo, fundentes y los aglomerantes cal, cola fría o silicato de sodio.
- ii. Poner a prueba un mezclador de paletas continuo y verificar su utilidad para el proceso de fabricación de briquetas.
- iii. Probar el equipo para fabricación de piezas de hormigón, en particular la ladrillera como maquinaria a emplear para el proceso de moldeo y briqueteado (sin alta compresión) en la planta.

A continuación se plantea la metodología de las pruebas a realizar con una carga de material en escala productiva. Para replicar los ensayos realizados en escala de laboratorio, se mantiene la proporción de componentes de la briqueta, pero se considera una carga total aproximado de mezcla de 300 kg con la siguiente dosificación:

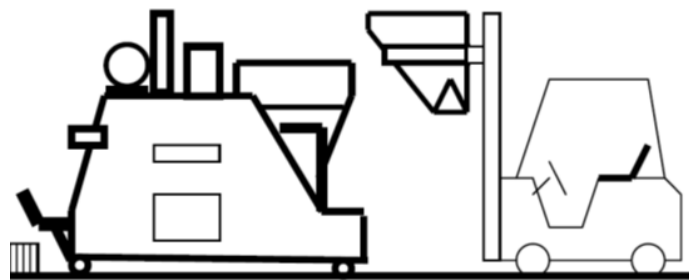
- i) 5 a 15% ligante respecto a la mezcla entre la PBat y fundentes;
- ii) 8% Ceniza de Soda;
- iii) 72% PBat con % de humedad respectivo a cada ligante;
- iv) 10 % Carbón;
- v) 10% Fierro.



- 1 Tolva
- 2 Vibrador 0,18 kW
- 3 Motor mezclador 5,5 kW
- 4 Accionamiento válvula de la tolva
- 5 Zona de transporte de material
- 6 Mezclador de paletas

**Figura 4.10: Mezclador de paletas utilizado en fase preparatoria de briquetas de escala productiva.**

Una vez realizada la mezcla, se carga la cantidad total procesada en la tolva del mezclador, que se muestra en la figura 4.10. Posteriormente, el material procesado es llevado cargado en una ladrillera como en el esquema de la figura 4.11.



**Figura 4.11: Esquema de carga de la tolva de la ladrillera en generación de briquetas a escala productiva.**

De manera alternativa, se dispone de un segundo mezclador con una capacidad de carga menor a 50 kg de pasta, que se muestra en la figura 4.12.



**Figura 4.12: Mezclador de paletas Menegotti, empleado en ensayos de escala productiva [17].**

## 5. Resultados

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos de los ensayos realizados según la metodología planteada, abordando los aspectos principales de la definición de los materiales empleados, los ensayos de caracterización de los procesos de mezclado, secado y briqueteado; para finalmente indicar un diseño general de la línea de procesos y las especificaciones respectivas.

### 5.1 Ensayos de definición de procesos

En esta sección se detallan los principales resultados obtenidos de acuerdo a la serie de ensayos realizados que apuntan a la caracterización del material de trabajo, así como los parámetros de procesos desde el mezclado hasta el secado.

#### 5.1.1 Caracterización de la materia prima

##### i. Densidad

En la tabla 5.1 se reportan los pesos obtenidos de materiales con que se trabajan de acuerdo al procedimiento establecido en la sección 4.1.1. En virtud de lo anterior, la tabla 5.2 muestra los valores calculados de densidad aparente de los componentes de interés.

**Tabla 5.1: Registro de pesos de materiales.**

Material	Peso medido [g]			
	Volumen [ml]			
	200	400	600	1000
Carbón	576	1.228	1.806	2.948
Ceniza Soda	242	482	730	1.186
Fierro	348	712	1.030	1.864
Borras Anódicas	410	916	1.426	2.418
Pasta de Baterías	490	1.070	1.686	3.022

**Tabla 5.2: Densidad aparente de materiales.**

Material	Densidad Aparente [g/cm <sup>3</sup> ]				Densidad Promedio [g/cm <sup>3</sup> ]
Carbón	2,88	3,07	3,01	2,95	2,98
Ceniza de Soda	1,21	1,21	1,22	1,19	1,20
Fierro	1,74	1,78	1,72	1,86	1,78
Borras Anódicas	2,05	2,29	2,38	2,42	2,28
Pasta de Baterías	2,45	2,68	2,81	3,02	2,74

A continuación se consignan un par de elementos a considerar y que se refieren a los resultados calculados por su virtual distorsión en un caso de densidad aparente y densidad medida:

i. El primero es el fierro donde se aprecia que al tener una morfología de escamilla (piedrecillas irregulares en tamaño y forma), y por lo tanto, claramente no es un material compacto ni uniforme, pues se evidencian muchos espacios internos. Es por esto que la densidad aparente calculada del carbón es sustancialmente más alta que la del resto de los componentes.

ii. El segundo caso es la PBat virgen en estado humeda tal y como se recibe desde la planta, donde también se evidencia una composición totalmente diversa ya que a simple vista se aprecian materiales plásticos, algunas gomas, metales y polvo de material pesado propiamente tal.

ii. Granulometría

El resultado de la granulometría se muestra en la tabla 5.3. En ella se consideran los materiales principales de la composición de la briqueta; la PBat virgen, la escamilla de hierro, la ceniza de soda y el carbón. Además se reportan el porcentaje que logra pasar al tamiz de las distintas mallas según el caso.

**Tabla 5.3: Granulometría de componentes de la mezcla plomada.**

Pasta de Batería			Carbón		
Tamiz	Peso acumulado	Porcentaje que pasa	Tamiz	Peso acumulado	Porcentaje que pasa
1/2"	12,50	100	1/4"	6,30	100
3/8"	9,50	94	N°4	4,75	99
1/4"	6,30	88	N°8	2,36	91
N°4	4,75	83	N°16	1,18	70
N°8	2,36	63	N°30	0,60	47
N°16	1,18	42	N°50	0,30	32
N°30	0,60	35	N°100	0,15	18
N°50	0,30	28	MF		2,43
N°100	0,15	19	Escamilla de Hierro		
MF		3,36	Tamiz	Peso acumulado	Porcentaje que pasa
Ceniza de Soda			3/4"	19,00	100
Tamiz	Peso acumulado	Porcentaje que pasa	1/2"	12,50	95
N°8	2,36	100	3/8"	9,50	40
N°16	1,18	100	1/4"	6,30	1
N°30	0,60	99	N°4	4,75	0
N°50	0,30	46	N°8	2,36	0
N°100	0,15	7	N°16	1,18	0
MF		1,48	MF		7,60

Uno de los principales elementos que corresponde mencionar es que se comprueba la apreciable diferencia del Módulo de Finura (MF) de la escamilla de hierro y el resto de los componentes considerados.

También hacer notar la mayor transición experimentada por la PBat a través de distintas mallas, lo cual comprueba la especial heterogeneidad de la constitución de la materia prima. Esto se desprende principalmente por la manufactura y procesamiento que ésta sufre a partir de las BPA.

Para concluir esta sección, el análisis granulométrico de los distintos componentes se centra principalmente en el módulo de finura. En términos generales, el material particulado cuyo módulo de finura es inferior a 3,0 normalmente se considera demasiado fino, lo cual repercute adversamente en los cambios volumétricos en presencia de humedad y una facilidad para almacenamiento, traslado y dosificación a través de conductos o tecnología de impulsión. En extremo opuesto, el material particulado con módulo de finura mayor de 3,5 resulta ser demasiado grueso y, también por sí solas, tienden a producir mezclas generalmente ásperas, segregables y proclives al escurrimiento de líquido.

El material particulado que se ensaya en el laboratorio posee un módulo de finura promedio simple de 3,72. Si se considera una ponderación de acuerdo a la composición establecida en los procedimientos del capítulo 4.1.1.ii, el valor está más cercano a la configuración de la PBat virgen, la cual de por sí es bastante heterogénea pese a el procesamiento y fraccionamiento de componentes durante el reciclaje.

### iii. Ángulo de reposo

La tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos para el ángulo de reposo,  $\theta_0$ , para la materia base, fundentes y algunos aglomerantes de interés. Además se reportan los diámetros basales medidos para una caída de material, con su respectivo promedio ( $D_1$  en este caso como ejemplo) y que se contrasta con el diámetro promedio  $D_A$ . El procedimiento y la obtención de dichas variables se especifican en el capítulo 4.1.1.iii de este trabajo. Como ejemplo, la figura 5.1 muestra un cono formado por polvo fino de PBat, donde se muestran algunos alcances prácticos sobre la dispersión en el plano de apoyo (distinta según el material) y la altura que alcanza cada carga del material.



**Figura 5.1: Cono formado por particulado fino de PBat.**

**Tabla 5.4: Ángulos de reposo calculados para los componentes de la mezcla base de las briquetas.**

<b>Ceniza de Soda</b>			<b>Diámetro Basal [mm]</b>	
$D_A$	113,33	[mm]	$\Phi_1$	112,00
d	9,00	[mm]	$\Phi_2$	115,00
H	38,10	[mm]	$\Phi_3$	110,50
Ángulo	36,14	[°]	$\Phi_4$	112,00
			$D_1$	112,38
<b>Carbón</b>			<b>Diámetro Basal [mm]</b>	
$D_A$	109,88	[mm]	$\Phi_1$	108,00
d	9,00	[mm]	$\Phi_2$	112,50
H	38,10	[mm]	$\Phi_3$	112,00
Ángulo	37,07	[°]	$\Phi_4$	112,50
			$D_1$	111,25
<b>Pasta de Baterías</b>			<b>Diámetro Basal [mm]</b>	
$D_A$	70,33	[mm]	$\Phi_1$	71,50
d	9,00	[mm]	$\Phi_2$	68,50
H	38,10	[mm]	$\Phi_3$	71,00
Ángulo	51,17	[°]	$D_1$	70,33
<b>Cal</b>			<b>Diámetro Basal [mm]</b>	
$D_A$	90,86	[mm]	$\Phi_1$	97,00
d	8,50	[mm]	$\Phi_2$	93,00
H	38,10	[mm]	$\Phi_3$	87,20
Ángulo	42,78	[°]	$\Phi_4$	93,20
			$D_1$	92,60
<b>Bischofita</b>			<b>Diámetro Basal [mm]</b>	
$D_A$	237,33	[mm]	$\Phi_1$	246,00
d	21,60	[mm]	$\Phi_2$	240,00
H	96,80	[mm]	$\Phi_3$	230,00
Ángulo	41,90	[°]	$\Phi_4$	236,50
			$D_1$	238,13



Particularmente para la bischofita se tuvo que considerar un montaje en escala, análogo a lo que se muestra en la figura 5.2, el en el que se muestra el ensayo con escamilla de hierro (que no se consignan sus datos por el tamaño promedio y su comportamiento en una escala distinta a la de polvo). Se respetó la razón entre la altura  $h$  y el diámetro de apertura  $d$  establecidos en el procedimiento original.



**Figura 5.2: Montaje de granulometría modificado para particulado grande.**

En ciertos momentos, la cal forma esferas pequeñas inestables que se descohesionan rápidamente. Al ser un material particulado fino e higroscópico (se humedece con el vapor de agua presente en el aire), tiende a estancarse. Independiente de que forme granos resistentes de diverso tamaño, la aparente humedad intrínseca hace que fluya discontinuamente.

### **5.1.2 Mezclado**

En la tabla 5.5 se aprecian los resultados de consistencia promedio para todas las mezclas y distribuciones estudiadas en el proyecto. En la tabla se registra y compara el comportamiento de las mezclas realizadas de acuerdo a las medidas de consistencia dadas por el cono de asentamiento.

**Tabla 5.5: Consistencias promedio del material de trabajo obtenidas luego de mezclado.**

Mezcla	Consistencia Promedio
O1D1	1,0 cm, consistencia plástica
O2D2	3,0 cm, consistencia fluida
O3D3	1,5 cm, consistencia blanda
O4D4	7,0 cm, consistencia fluida
O5D5	0,1 cm, consistencia plástica
O6D6	5,5 cm, consistencia fluida

Las configuraciones O1D1 y O3D3 corresponden a mezclas de PBat sin ceniza de soda, las cuales se muestran poco trabajables durante los ensayos; ya que la ausencia de ceniza de soda hace que la mezcla se seque y no aglomere. La mezcla O5D5 muestra cierta estabilidad dentro del desarrollo del ensayo, por lo que se considera un material de buena trabajabilidad.

En la configuración O4D4, se produce una gran complejidad para montar el cono de asentamiento porque se aprecia una fluencia importante de la mezcla, lo que da cuenta de la inestabilidad de las muestras con dicha configuración. Dentro de los resultados obtenidos muestra un descenso del nivel de altura del cono de 7 cm, además de una separación evidente de componentes entre el material fino (PBat, carbón) y grueso (pasto seco y fierro).

### 5.1.3 Briquetado

Los resultados relevantes expuestos consideran valores de presión calculados como razón entre las áreas de los cilindros de presión de la prensa utilizada y el área de briqueta que recibe la compresión (100 cm<sup>2</sup> para la briqueta cuadrada y la sección circular de diámetro 8,1 cm). Las lecturas de presión se realizan para unidades inglesas con su respectiva conversión. Para la utilización de equipo de alta presión, sobre los 50 kg/cm<sup>2</sup> en la briqueta se utiliza un diámetro de 12.5 cm de diámetro, como complemento a la prensa manual que se muestra en la figura 4.5.b.

Además, la capacidad nominal de presión de compactación de ambos equipos corresponde a valores mayores a 5000 psi (351,55 kg/cm<sup>2</sup>), lo cual se escapa a la aplicabilidad real de cada uno de los ensayos, por lo que se opta por magnitudes que impliquen cambios en humedad significativos frente a la conformación de briquetas.

#### i. Briquetas de sección cuadrada

El primer enfoque consiste en preparar briquetas de sección cuadrada. En la figura 5.3 se pueden ver las muestras que tienen la configuración O4D4, dicha imagen ratifica lo expuesto en el punto 5.1.2 respecto a la poca trabajabilidad, consistencia y resistencia de dicha mezcla, ya que las briquetas colapsan con facilidad.



**Figura 5.3: Muestras de briquetas compactadas de dosificación O4D4.**

ii. Briquetas cilíndricas

Para estas pruebas se confeccionaron briquetas de la mezcla O5D5 de diámetro 8,1 cm para dos muestras de 40 y 120 mm de altura, compactadas a una presión de 28,4 kg/cm<sup>2</sup>.

Estas muestras además se secaron en estufa con método convectivo a 130°C, como temperatura máxima y una velocidad de circulación del aire menor a 1 m/s. Los resultados de secado se muestran en la figura 5.18 de este mismo capítulo.

En términos generales, las briquetas presentan buen aspecto frente a la conformación final de su estructura, con borde definido y presentan buena resistencia mecánica.

#### 5.1.4 Compactación

i. Compactación de briquetas previo al secado.

Al compactar las muestras antes del secado se busca reducir el tiempo de secado y disminuir la fragilidad de las muestras.

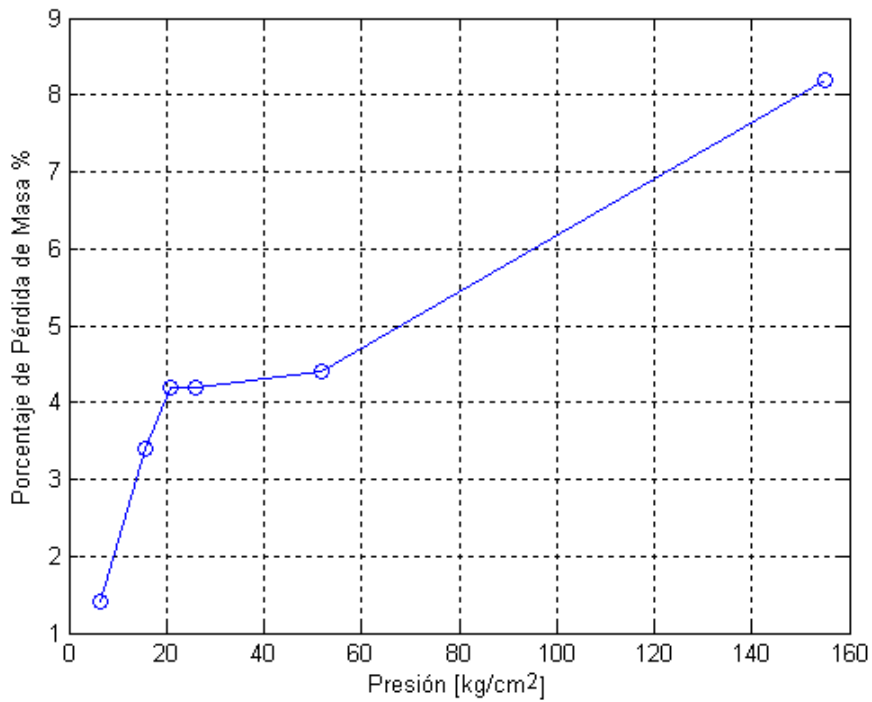
En la figura 5.4 se pueden ver dos muestras que fueron compactadas a la presión de 154,87 kg/cm<sup>2</sup>, es importante notar en dichas muestras que el pasto seco no disminuye la fragilidad de las muestras y tampoco aporta mejorando el secado, por lo anterior es que se descarta el pasto seco.



**Figura 5.4: Briquetas compactadas antes del secado de dosificación O5D5.**

ii. Compactación de PBat virgen.

En la figura 5.5 se aprecia la pérdida porcentual de masa debido al escurrimiento de agua en las muestras, en función de la presión de compactación. La PBat típicamente contiene un 18% de humedad.



**Figura 5.5: Efecto de la presión de compactación de PBat virgen con la pérdida de humedad.**

En dicho gráfico se aprecia que a una presión de 155 kg/cm<sup>2</sup> se extrae un 8,2% de masa, el mayor valor dentro de las muestras estudiadas. No obstante lo anterior, la presión aplicada durante la compactación de la PBat es muy elevada lo cual no hace descartar esta alternativa.

Por otro lado una presión de 21 kg/cm<sup>2</sup> remueve un 4,2% de humedad, siendo esta presión notoriamente menor a la primera; junto a lo anterior se puede agregar que no se registran cambios sustanciales hasta una presión de 52 kg/cm<sup>2</sup> donde se remueve un 4,4%.

En términos generales, se aprecia una respuesta variable de acuerdo al rango de presión aplicada. Respecto de la aplicación de presiones menores a 20 kg/cm<sup>2</sup>, dicho intervalo se caracteriza por un proceso de estrujado rápido, dado básicamente por el flujo del exceso de humedad externa presente y el respectivo escurrimiento rápido de material. Hay que considerar que dicho exceso determina además un manejo completamente distinto del material de trabajo.

Posteriormente se destaca un rango intermedio de remoción constante de humedad en torno a 20 - 55 kg/cm<sup>2</sup> de presión de compactación aplicada, dado principalmente por un cambio de la estructura física de los distintos componentes del material de trabajo. Esto se apoya con la distinta gama de MF obtenidos en la granulometría de dichos componentes.

Así, la consistencia y resistencia obtenida tras la aplicación de esta presión; por un lado, evidencia el hecho de que no pueda ser extruido; y por otro, la capacidad de flujo y la trabajabilidad de la pasta virgen quedan notoriamente condicionadas por la retención adecuada de humedad. Para rangos de presión mayores a este tramo o rango intermedio, adquiere una consistencia particularmente arenosa y, por lo tanto, se visualizan complicaciones importantes respecto a consolidación y estabilidad del briqueteado.

Finalmente se produce un estrujado lento en la medida que se aumenta la presión al compactar la PBat.

### iii. Compactación de Mezcla O5D5 con pasta de batería seca

Luego de compactar la PBat a 20,65 kg/cm<sup>2</sup> se mezcla con el resto de los elementos y el resultado se puede ver en la figura 5.6, es posible notar que la mezcla se ve con muy poca humedad y a una compactación leve la mezcla no se aglomera.



**Figura 5.6: Mezcla con PBat compactada.**

Con esta mezcla se realizan 9 muestras que se someten a compactación en 9 magnitudes distintas de presión, los resultados se pueden ver en la figura 5.7.

Las muestras que se presentan en las figuras 5.7.a, 5.7.b y 5.7.c se aprecia que, a medida que aumenta la presión de compactación, las muestras siguen siendo inestables y muchas partículas superficiales se desprenden con facilidad. El núcleo de dichas briquetas es ligeramente resistente.

Un segundo grupo de muestras, que corresponden a las figuras 5.7.d, 5.7.e y 5.7.f se exponen las briquetas compactadas con niveles de presión intermedios (entre 65 y 90 kg/cm<sup>2</sup>). En ellas se ve un aumento de la resistencia, después de manipular y retirar las partículas poco aglomeradas pierden 6 g de masa cada una.

La figuras 5.7.g y 5.7.h corresponden a la muestras sometidas a 103 kg/cm<sup>2</sup> y 116 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. Éstas se fracturan a esfuerzos moderados y luego de manipular la muestra pierde 4 g de masa. Desde este nivel de presión ya es posible transportar las muestras sin que se pierda mucha masa en su manipulación.



**Figura 5.7: Briquetas cilíndricas muestras O5D5 compactadas a distinta presión.**

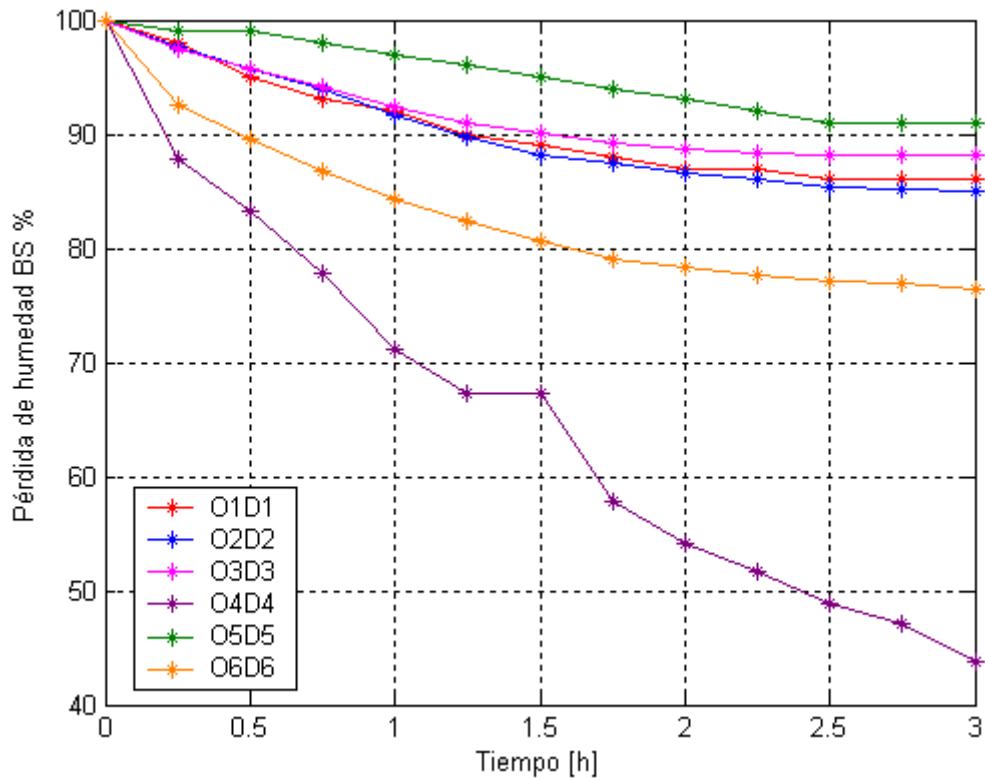
Finalmente, la muestra de la figura 5.7.i también se fractura a esfuerzos moderados, luego de manipularla y retirar las partículas que quedan poco adheridas en la superficie, ésta pierde 2 g de masa.

A partir de los resultados se establece que los niveles de la presión aplicada influyen predominantemente frente a la manipulación de las briquetas. Se presentan dificultades prácticas en la aplicación de mayores niveles de compactación. Los mejores resultados se aprecian a una presión de 103 kg/cm<sup>2</sup> para realizar las pruebas de secado.

### 5.1.5 Secado

La construcción de las curvas de secado fue realizada en función de la pérdida de masa-humedad que se medía cada intervalo de 15 min, tomando como referencia el peso anhidro como la base seca; tal y como se explica en la ecuación (6) de la sección 3.3 de antecedentes.

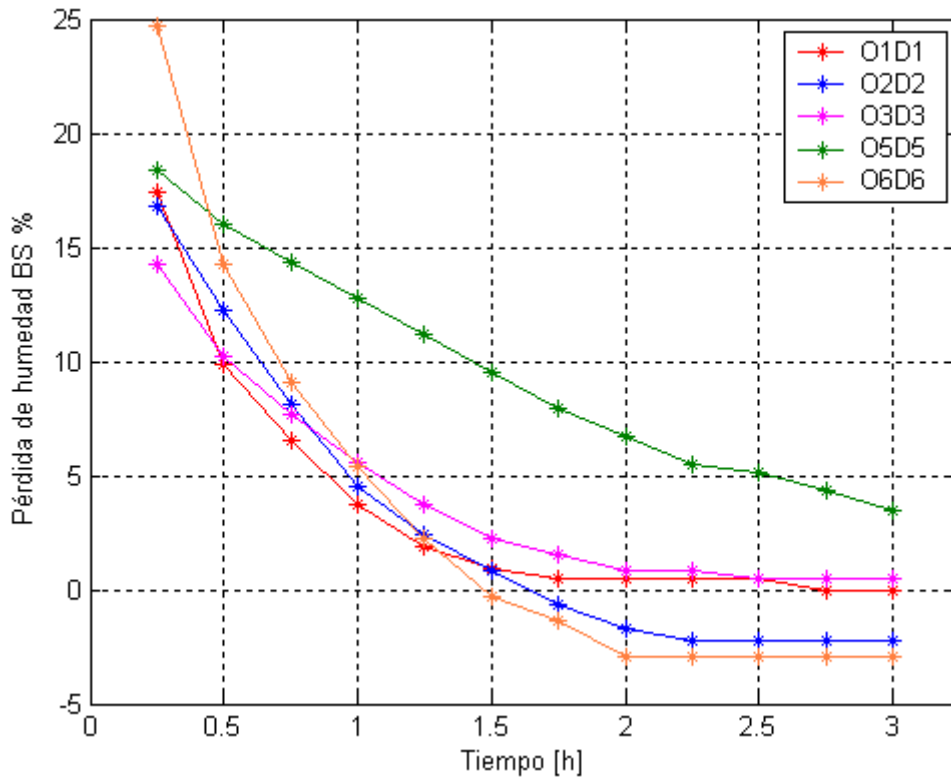
i. Briquetas sin compactación.



**Figura 5.8: Curvas de secado convectivo, briquetas sección cuadrada.**

En la primera aproximación se realizan pruebas de secado a muestras de sección cuadrada. En la figura 5.8 se aprecia una prueba de secado de 3 h, donde se ve la evolución en el tiempo de la pérdida de humedad en briquetas sin compactar. En general, se evidencia un comportamiento de estabilización al abarcar el horizonte de tiempo fijado. La mayor parte de las muestras logra mantener cierto grado de estabilidad para ser sacada del secador y transportada a otro sector. Esto no se cumple en el caso de la configuración O4D4 en estos ensayos las muestras perdieron el 60% de su peso inicial.





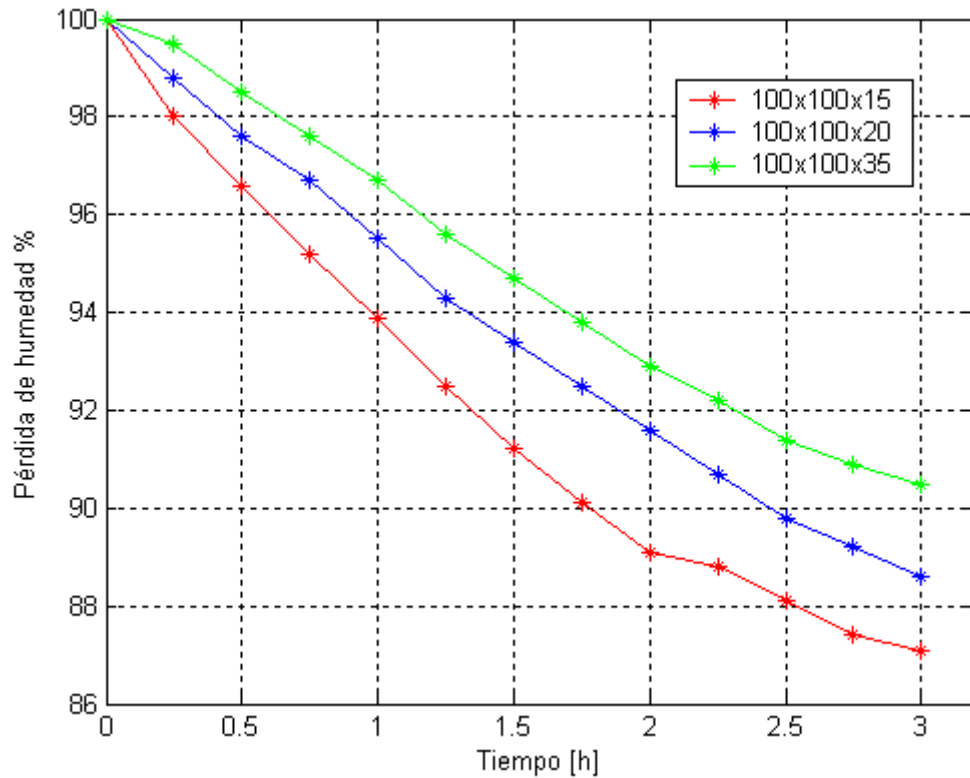
**Figura 5.9: Detalle de pérdida de humedad BS en secado convectivo.**

El gráfico de la figura 5.9 es un detalle del gráfico anterior, donde se descarta la curva representativa de O4D4 en virtud de su progresiva pérdida de masa debido a su desarme generalizado, el cual hizo imposible su manejo tras la prueba.

Las curvas representativas de las dosificaciones O2D2 y O6D6 presentan una respuesta negativa luego de 2 h de secado convectivo, debido a la pérdida de material granular durante la pérdida de humedad y manipulación. Es por esto que en la figura 5.9 se da cuenta de la pérdida de masa que cae por debajo del 0% tomado en base seca.

Debido a lo anterior y a la dificultad para mezclar y homogeneizar el material de trabajo, se descartan las configuraciones O2D2, O4D4 y O6D6.

En las curvas de secado de la figura 5.10 se puede ver que las briquetas de  $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$  se secan levemente más rápido que las otras de mayor peso.



**Figura 5.10: Curvas de secado muestras O5D5, briquetas de sección cuadrada.**

Con el gráfico anterior se da el primer indicio de que en caso de consolidar briquetas estables, se considera apropiado utilizar briquetas de espesores pequeños, en desmedro de la muestra de mayor espesor (35 mm), ya que el tiempo de secado establecido en el ensayo permite alcanzar el peso anhidro comparativamente más rápido que en el caso de una muestra más angosta.

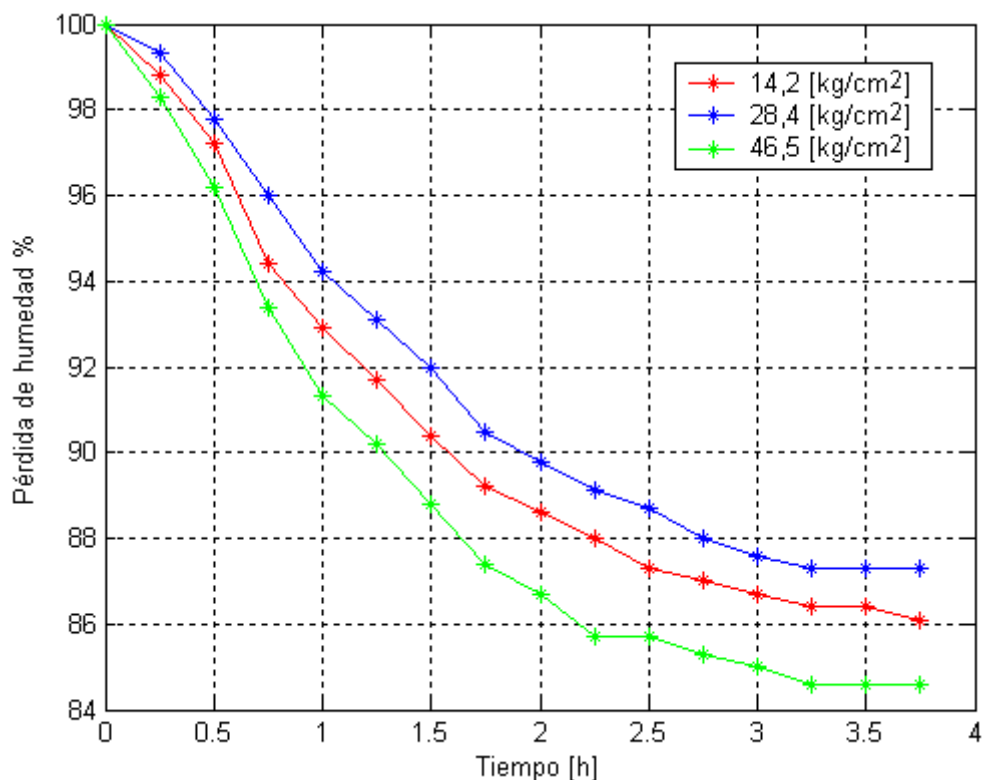
Esto se explica con el mecanismo de migración de humedad interna y la retención efectiva de la humedad que ocurre en la medida en que la razón de superficie/volumen es mayor en el caso de tener 15 mm de espesor ( $SV = 1,73 \text{ cm}^{-1}$ ) frente a 35 mm ( $SV = 0,97 \text{ cm}^{-1}$ ) de acuerdo a la inercia y resistencia que se tiene que vencer para que comparativamente por porcentajes de pérdida, se llega a resultados equivalentes.

ii. Briquetas compactadas antes de secar.

Debido a que las briquetas sin compactar demuestran un comportamiento frágil y se les desprende mucho material durante su manipulación, se decide hacer ensayos de secado usando briquetas compactadas previamente.

En la figura 5.11 se aprecia un ensayo de secado convectivo para 3 muestras cilíndricas de 4 cm de altura y 8,1 cm de diámetro. Dichas muestras fueron compactadas previamente al secado cada una a distintos niveles de presión, esto es; 14,2, 28,4 y 46,5  $\text{kg/cm}^2$ . Además los parámetros de secado convectivo se realizaron para las 3 muestras a una temperatura máxima en el lecho del secador de 135°C y una velocidad de flujo de 1 m/s.

Es importante recordar que la evolución de la humedad que va reteniendo cada una de las muestras en el tiempo y su estancamiento, se debe a que en dicho gráfico no se considera la pérdida de líquido durante la compactación. Por lo tanto, la humedad que se está aludiendo es humedad relativa post-estrujado de pasta virgen. A pesar de lo anterior, es posible notar que el tiempo de secado de las muestras es de aproximadamente 3,7 h.



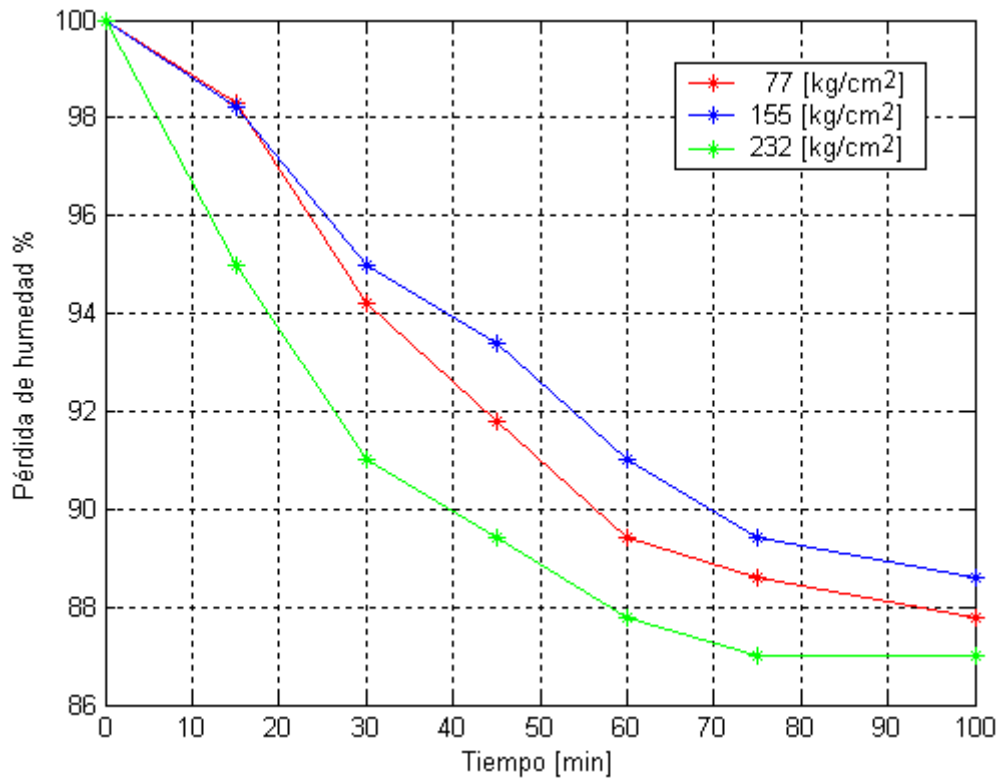
**Figura 5.11: Secado convectivo de muestras cilíndricas pre-compactadas.**

Lo anterior hace considerar que la diferencias relativas a la pérdida de humedad entre cada una de las presiones se mantiene en rangos acotados, respeta el mismo régimen de evolución en el tiempo y no cambian considerablemente la ventana de tiempo en que las muestras alcanzan el punto de equilibrio o de establecimiento.

Por otro lado las muestras compactadas mostradas en la figura 5.11 se mostraron mucho menos frágiles que las no compactadas; esto es, primera tanda de briquetas generadas sólo por moldeo de geometría tipo paralelepípedo. Sin embargo, las presiones utilizadas en las muestras de la figura 5.11 no son suficientes para que las muestras no se degraden cuando son manipuladas.

Luego de los ensayos anteriores, se decide realizar muestras utilizando presiones más elevadas, en este caso si se considera la pérdida de agua durante la compactación, en la figura 5.12 se pueden ver las curvas de secado de este ensayo.

En los gráficos que siguen a continuación (las figuras 5.12 y 5.14), la ventana de tiempo de realización de ensayos se ve reducida considerablemente, por lo que los resultados expuestos se expresan en minutos.



**Figura 5.12: Pérdida de humedad en compactación y secado muestras O5D5.**

La continuación de los ensayos de pérdida de humedad de la figura 5.11 corresponde a subir el nivel de compactación aplicada y construir la curva de secado respectiva.

En la figura 5.12, se aprecia que para una presión de 232 kg/cm<sup>2</sup> es la que pierde más humedad en la compactación y además es la que se seca más rápidamente. Entre la presión de 77 kg/cm<sup>2</sup> y 155 kg/cm<sup>2</sup> no existen grandes diferencias, ya que ambas muestras tardan el mismo tiempo en secarse y comparativamente, en ambos casos la pérdida de humedad es menos drástica y evidente a lo largo del horizonte de tiempo considerado. Además, al final del ensayo se aprecia que se logra remover prácticamente la misma cantidad de humedad en la compactación en estos dos últimos casos.

Dentro de los principales cambios que se muestran entre las figuras 5.11 y 5.12, se destaca la notable reducción del tiempo para alcanzar la condición anhidra o de equilibrio y que, de manera simultánea, hay mayor remoción de humedad (en promedio) para presiones mayores.

Para ambos casos se ve que dentro de cada tramo de presión de compactación, la diferencia de la humedad evacuada al establecerse la condición de equilibrio está dentro de un rango acotado a un 5% por lo que, en ese sentido se descarta la presión de compactación de briquetado como una variable que influya y determine la condición final de estabilidad del producto final.

Por otro lado, es notable que las briquetas compactadas a presiones sobre 65 kg/cm<sup>2</sup> presentan una alta resistencia a la flexión.

iii. Briquetas compactadas antes de secar producidas con PBat estrujada.

En esta sección se muestran los resultados de la producción de briquetas con la mezcla del tipo O5D5 previamente estrujada, con el objetivo de retirar humedad del material base antes de mezclar.

En la figura 5.13.a y 5.13.b se aprecian briquetas de dosificación O5D5 antes y después de someterlas al secado convectivo. Es muy relevante considerar la estabilidad y compacidad de las muestras en verde y secas que no pierden material por manipulación.



**Figura 5.13: Muestras de ensayo de pre- y post-secado con PBat seca; a) briqueta compactada, b) briquetas luego de 0,75 h de secado.**

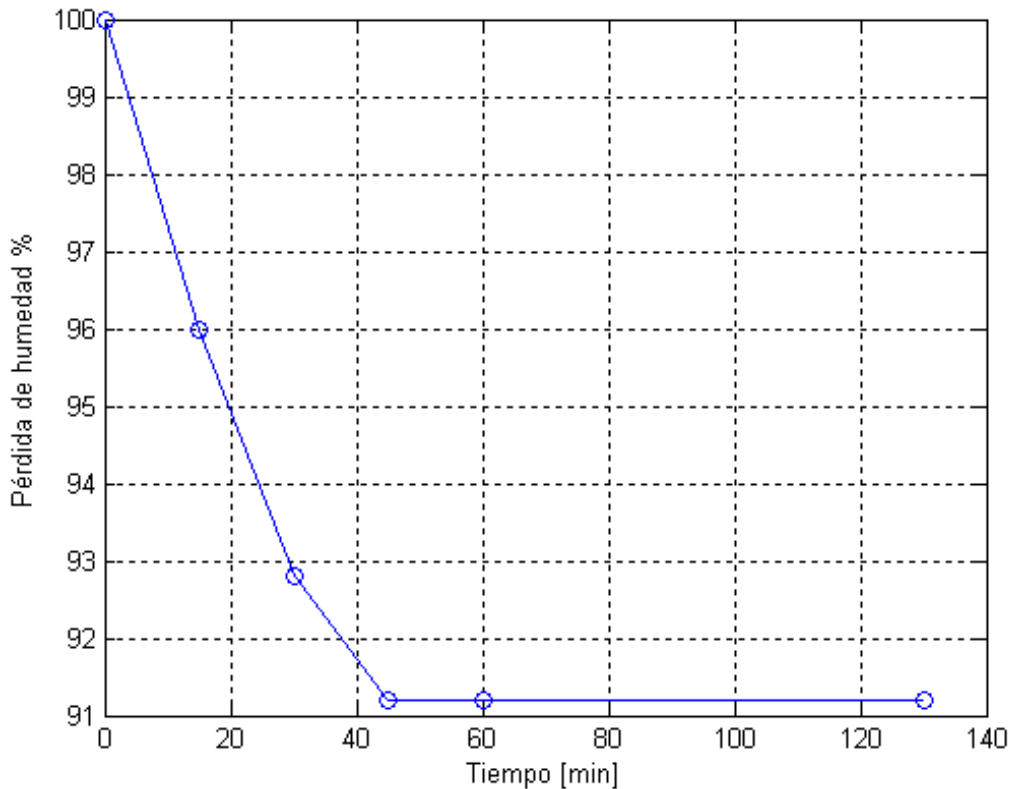
En la figura 5.14 se observa el gráfico de pérdida de humedad en base seca para briquetas del tipo O5D5 con PBat estrujada con muestras de forma tipo paralelepípedo en moldes de dimensiones 100x100x20 mm<sup>3</sup>. Para este caso, se puede notar que el tiempo de secado es cercano a 45 min llegando a perder 8,8% del peso inicial.

Al realizar una estimación de la humedad contenida en las briquetas, para una base del 18% (en peso) de humedad a retirar, éstas deben tener 13,8% de humedad antes de ser secadas. Lo anterior considera lo que aporta en humedad presente en los componentes por separado y restando el 4,2% que es removido por el estrujado de la pasta virgen (como base de carga de 1,3 kg de pasta húmeda).

Si se compara la ventana de tiempo en la estabilización anhidra de las briquetas con lo obtenido en la figura 5.12, se aprecia que ese ensayo remueve cerca de un 12%. Al realizar el mismo análisis en el ensayo de la figura 5.14, el máximo porcentaje que se alcanza es de un 9% aproximadamente, considerando la humedad de la PBat y la humedad que aporta el silicato (cerca del 40% del silicato líquido es agua) y una vez que ya se ha evacuado la humedad presente en el material base.

Lo anterior hace pensar que desde el punto de vista de la remoción de humedad ambos procesos obtienen resultados similares. No obstante, de acuerdo al tiempo de secado, el proceso que incluye compactar la pasta antes de mezclar tarda

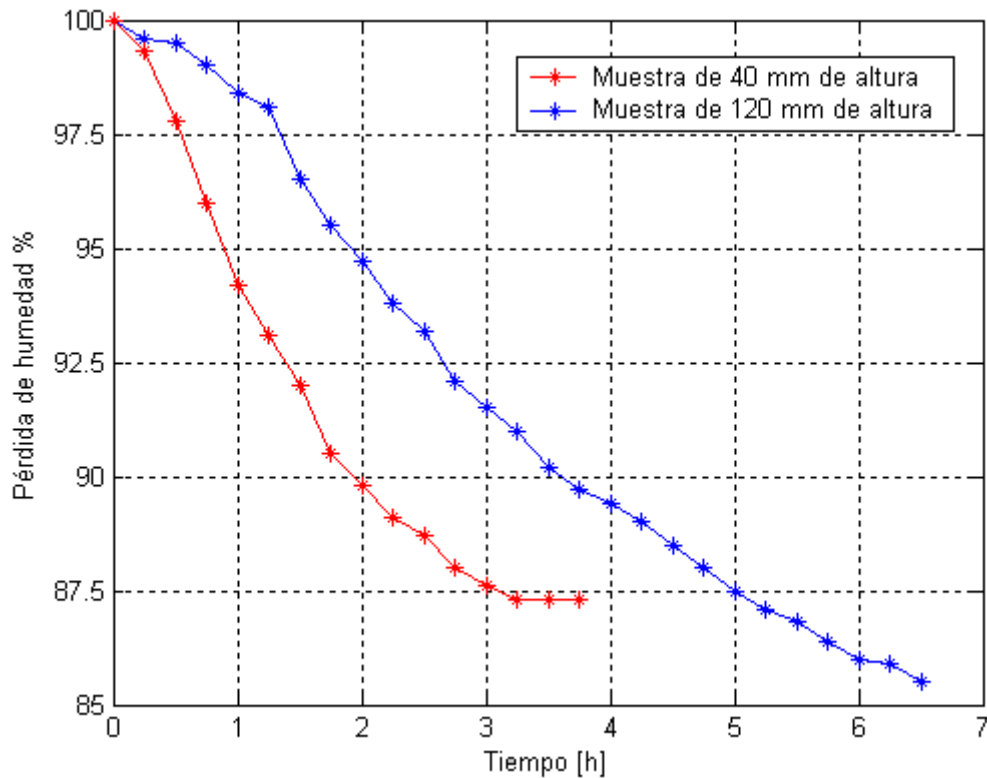
55 min menos, es decir, un 45% del tiempo que demora el proceso sin estrujar la PBat virgen y en ambos casos pre-compactando las briquetas antes de secarlas.



**Figura 5.14: Curva de secado de muestra O5D5 usando PBat estrujada.**

En la figura 5.15 se muestra el gráfico de la evolución de la pérdida de humedad en las briquetas compactadas bajo las condiciones del punto 5.1.2.ii. Respecto de las diferencia en el porcentaje que alcanza cada muestra cuando se secan, ésta corresponde a una magnitud menor del 2%, considerando que en este ensayo no se toma la referencia de la pérdida de agua durante la compresión.

Dentro de las mediciones realizadas, la mayor pérdida porcentual corresponde a la briketa de 120 mm de altura. Sin embargo, es posible notar que muestra de 40 mm se seca en un 60% del tiempo de la muestra de 120 mm de altura, lo cual ratifica que las muestras de mayor razón de superficie/volumen permiten alcanzar el punto de equilibrio en menor tiempo (para el cilindro de 40 mm de altura,  $SV = 0,99 \text{ cm}^{-1}$ , mientras que para el otro cilindro  $SV = 0,66 \text{ cm}^{-1}$ ).



**Figura 5.15: Pérdida de humedad con compactación de muestras cilíndricas de material de trabajo con dosificación O5D5.**

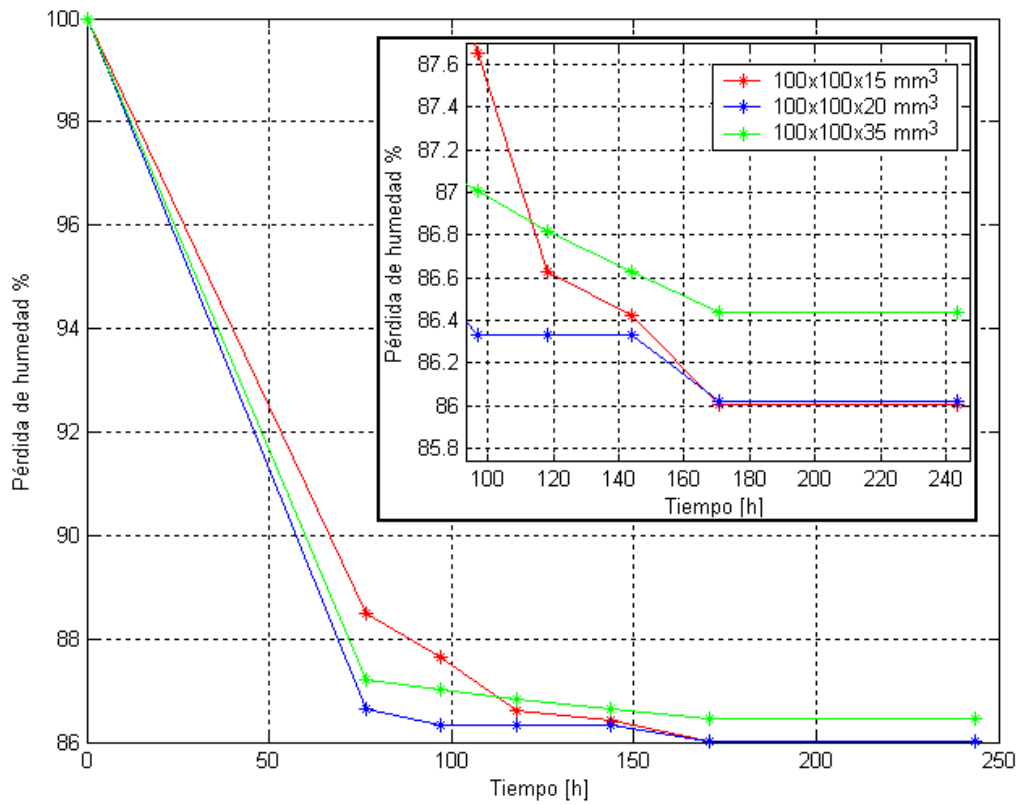
Dicho factor geométrico permite tener una referencia acerca del tiempo de secado necesario para la reducción de humedad. Las experiencias sobre los distintos niveles de compresión permiten generar briquetas estables y poco susceptibles a desgranarse. En ese caso, la pérdida de humedad no se ve directamente afectada ya que no varía dentro de intervalos no mayores al 4%.

iv. Secado al aire libre.

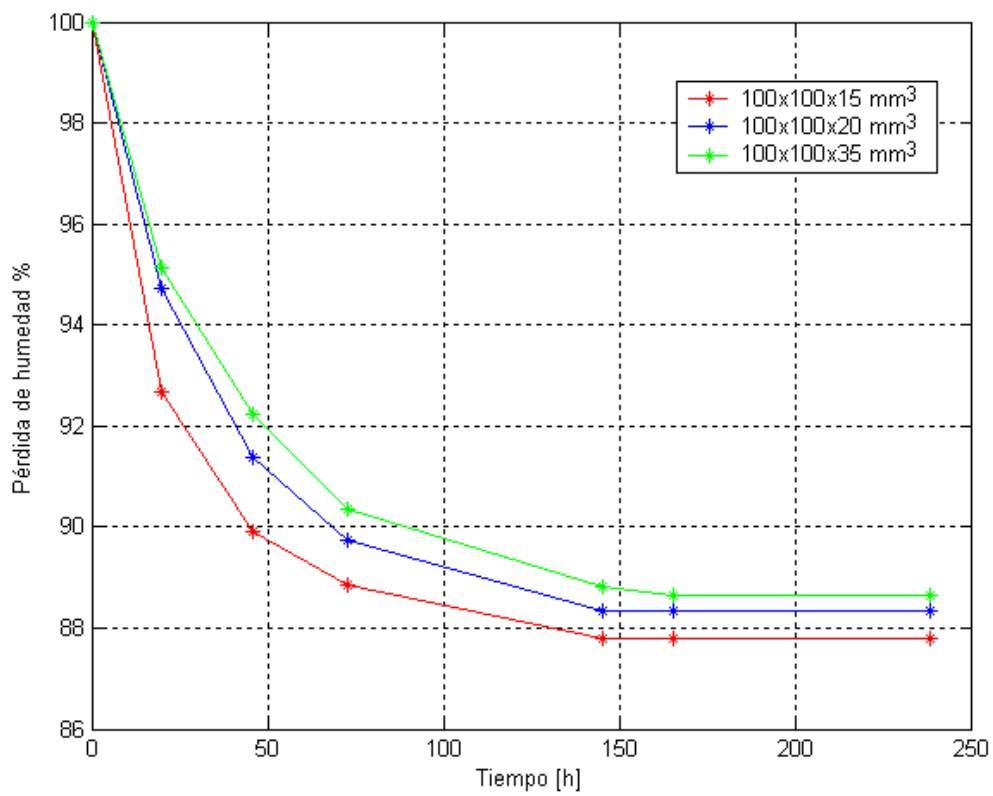
En este caso se establece el tiempo en que se alcanza el punto de equilibrio (o peso anhidro) bajo la construcción de curvas de secado de manera análoga a la que se aplica al secado convectivo. Para esto, se toman medidas discretas en el tiempo para obtener la curva respectiva. Dicho procedimiento se aplica para las dosificaciones consideradas en las tablas 4.5 y 4.7 del capítulo anterior de este trabajo.

Como referencia las figuras 5.16 y 5.17 muestran las curvas de secado al aire libre para las briquetas producidas en dosificaciones O1D1 y O3D3 respectivamente. Los puntos de equilibrios (anhidro) de pérdida de humedad en cada dosificación alcanzan valores promedios de 86% y 88,7%.

Se consideran distintos factores que intervienen en este proceso. Se tiene un registro inicial de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa del aire) pero estas varían a lo largo del tiempo y, entonces, hay cambios relevantes respecto de la rapidez de secado (N) como por ejemplo las condiciones climáticas y los límites (mínimos y máximos) de temperatura y humedad.



**Figura 5.16: Pérdida de humedad en mezcla O1D1 al aire libre.**



**Figura 5.17: Pérdida de humedad en mezcla O3D3 al aire libre.**



Hay que hacer notar que la variación entre los tiempos de secado que se obtuvieron para todas las mezclas cabe dentro del 10% en torno a las 170 h totales. Para todos los casos, se obtiene una conformidad bastante baja ( $Con = 1$ ), con baja resistencia, una facilidad para desgranarse y una generación de material fino volátil que, en contacto con la atmósfera se torna en un tono blanquecino difícil de manipular.

## 5.2 Trabajabilidad de la PBat

De acuerdo a los ensayos de caracterización efectuados, la trabajabilidad consiste en el grado de manipulación con el cual los materiales de trabajo son susceptibles a las transformaciones necesarias para obtener el producto final. Estos ensayos efectuados con PBat sin aditivos muestran que el material de trabajo no es adecuado para la extrusión directa, puesto que bajo ningún caso era capaz de fluir totalmente la carga inicial del molde.

Hay que hacer la diferencia que en el caso de mayor proporción de agua en la carga del molde, sale una fracción del interior y en la medida que aumenta la fuerza aplicada por compresión, la PBat va perdiendo líquido (agua y polvo fino disuelto en agua que escurre) y progresivamente se acumula en la salida hasta bloquearla completamente.

La PBat corresponde a un material heterogéneo con material fino, sólido plástico (estructura tipo laminar-hojuela, de largo variable) y sólidos metálicos de diámetro equivalente de 1 cm promedio. Dicha aglomeración en las paredes de los contenedores lleva a aplicar trabajo necesario para poner en movimiento y desarmar dichas coalescencias.

Las condiciones del ambiente determinan los límites de solubilidad del agua presente en el material de trabajo. Dentro de las observaciones realizadas, la separación de fases entre la humedad que migra hacia las paredes de los contenedores y la PBat y en el seno tiene una consistencia arenosa, húmeda para el material constitutivo de la pasta virgen.

Durante el trabajo con PBat se aprecia que la masa del producto contiene una cantidad importante de restos de carcasas (trozos de plástico y fibras), que puede dificultar la consolidación de briquetas en su manipulación. Sin embargo, también se verifica que las fibras y trozos plásticos pequeños ayudan a la densificación de las briquetas en el momento de desmoldar, promoviendo resistencia al desgranamiento si dicha distribución se asegura por medio de mezclado que sea lo más homogénea posible.

En presencia de agua, los distintos componentes clara y rápidamente se separan, de modo que los sólidos plásticos presentes quedan en suspensión; el metal presente queda relativamente disperso en el fondo del volumen; una gran fracción del material fino precipita y el resto de material fino se dispersa en el agua que se adiciona. De momento en que la mezcla se deja en reposo por par de horas, el material fino que se deposita en el fondo ofrece resistencia cuando se tiene que remover.

Finalmente, en esta sección se concluye que la PBat como material de trabajo presenta rangos bien acotados de trabajo. La evidente diferencia del comportamiento de la PBat según el agua contenida hace ver que puede escurrir el material base, que

no se puede almacenar por tiempos prolongados y que necesita estar en movimiento, particularmente con el proceso de mezclado para tener una distribución uniforme. Así como también se tiene que evitar la pérdida de material fino cuando el exceso de agua es elevado, pues al perder humedad el barro compuesto por este material fino permite tener confinado los distintos componentes de la pasta virgen.

### **5.3 Ensayos para determinación de ligante**

En esta sección se informan los ensayos realizados para identificar y probar distintos aglomerantes que generen briquetas estables con un porcentaje de adición acorde con la proporción de fundentes. Para esto, se reportan los principales resultados para cada uno de los ligantes utilizados, destacando esencialmente aquellos en los que se obtuvieron los mejores resultados. El recuento de todos los ensayos realizados para este ítem se muestra en la tabla 5.6, con indicadores de variables de presión aplicada en el estrujado, la presión aplicada durante el briqueteado y la conformidad final (Con) de la briketa establecida según la metodología presentada en el capítulo 4.3.

De manera preliminar, se prueban los ligantes y si ofrecen una mejor constitución y consolidación de una briketa, se sigue probando con distintas proporciones. En base a esto, se descarta en primera instancia la harina y greda ya que se obtenía el mismo resultado de desarme y poca resistencia que la briketa sin ningún ligante.

A modo de referencia, una de las pruebas que se realizan a las briquetas una vez que se producen es probar la resistencia al impacto a través de golpes a una superficie firme.

Los ensayos realizados en esta sección consideran a la PBat inicialmente saturada en líquido y luego estrujada. Los siguientes ligantes son los que permiten obtener briquetas compactas, con facilidad para desmoldar la briketa y con mayor resistencia a la manipulación:

- i. La cal es un aglomerante con la que se generaron briquetas estables y manipulables, aunque tiene una tendencia a producirse una fracción de particulado fino una vez terminada la briketa. Luego del secado, la briketa no se rompe y ofrece resistencia a la aplicación de fuerza.

No se desprende de manera apreciable material particulado al golpearla con una base firme. En las esquinas es fácil desgranar la briketa, debido principalmente a las dificultades presentes al desmoldar y a que cuando se llena el molde con el material de mezcla, se conjuga de manera parcial la aglomeración. Este problema se reduce al aumentar de manera controlada la humedad presente en la mezcla, dado por el estrujado de la pasta virgen.

Si bien es cierto que con una mayor presencia de humedad se presentan menos atascamientos del sólido al momento de desmoldar, logra la consolidación y endurecimiento en un tiempo más corto que un caso más seco. Este efecto es más notorio con una mayor presencia de aglomerante (en torno al 10%).

**Tabla 5.6: Resumen de ensayos realizados para determinación de ligante.**

Nº de Prueba	Presión de Estrujado [kg/cm <sup>2</sup> ]	Aglomerante	Concentración [%]	Molde	Presión de Briqueteado [kg/cm <sup>2</sup> ]	[Con]	Secado
1	Sin estrujar	Yeso	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	≤ 1	0	Ambiente 17 días
2	Sin estrujar	Yeso	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	≤ 1	1	Ambiente 17 días
3	Sin estrujar	Cal	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	≤ 1	3	Ambiente 17 días
4	Sin estrujar	Bentonita	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	≤ 1	1	Ambiente 17 días
5	Sin estrujar	Silicato	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	≤ 1	3	Ambiente 17 días
6	Sin estrujar	Harina	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	≤ 1	3	Ambiente 17 días
7	Sin estrujar	Cola Fría	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	≤ 1	2	Ambiente 17 días
8	Sin estrujar	Cola Fría	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	≤ 1	2	Ambiente 17 días
9	31	Cal	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	12	1	Ambiente 15 días
10	31	Cal	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	12	2	Ambiente 11 días
11	31	Yeso	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	12	1	Ambiente 11 días
12	31	Silicato	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	12	0	Ambiente 11 días
13	31	Bentonita	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	12	1	Ambiente 11 días
14	31	Cola Fría	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	12	2	Ambiente 11 días
15	31	Cal	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	1	Ambiente 4 días
16	31	Cal	10	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	0	Ambiente 4 días
17	31	Bentonita	10	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	2	Ambiente 4 días
18	31	Silicato	10	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	2	Ambiente 4 días
19	31	Cola Fría	10	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	3	Ambiente 4 días
20	31	Bischofita	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	2	Ambiente 2 días
21	31	Bischofita	10	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	1	Ambiente 2 días
22	31	Bentonita	15	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	1	Ambiente 2 días
23	31	Silicato	7	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	1	Ambiente 2 días
24	31	Cola Fría	7	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	2	Ambiente 2 días
25	16	Cal	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	3	Ambiente 24 h
26	16	Bischofita	5	Cuadrado 10x10 cm <sup>2</sup>	2	3	Ambiente 24 h
28	25	Silicato	10	Cilíndrica φ = 8 cm	3	3	Ambiente 24 h
29	25	Cola fría	10	Cilíndrica φ = 8 cm	3	1	Ambiente 24 h
30	12,5	Cal	5	Cilíndrica φ = 8 cm	3	1	Ambiente 24 h
31	12,5	Bischofita	5	Cilíndrica φ = 8 cm	3	2	Ambiente 24 h
32	25	-	-	Cilíndrica φ = 8 cm	25	0	Ambiente 24 h
33	25	Cal	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	2	Ambiente 24 h
34	25	Bischofita	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	3	Ambiente 24 h
35	25	Silicato	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	2	Ambiente 24 h
36	25	Cola fría	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	2	Ambiente 24 h
37	25	Bentonita	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	2	Ambiente 24 h
38	25	-	-	Cilíndrica φ = 8 cm	50	2	Ambiente 24 h
39	25	Bischofita	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	3	Ambiente 24 h
40	SA3	Silicato	10	Cilíndrica φ = 8 cm	100	2	Ambiente 24 h
41	SA3	Bischofita	10	Cilíndrica φ = 8 cm	100	0	Ambiente 24 h
42	50	Bischofita	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	3	Ambiente 24 h
43	50	Silicato	10	Cilíndrica φ = 8 cm	25	3	Ambiente 24 h
44	12,5	Cal	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	2	Ambiente 24 h
45	50	Cola fría	7	Cilíndrica φ = 8 cm	25	3	Ambiente 24 h
46	100	-	-	Cilíndrica φ = 8 cm	50	2	Ambiente 24 h
47	25	Cal	5	Cilíndrica φ = 8 cm	25	2	Ambiente 24 h
48	25	Cola fría	7	Cilíndrica φ = 8 cm	12,5	2	Ambiente 24 h
49	25	Cal	7	Cilíndrica φ = 8 cm	25	2 a 3	Ambiente 24 h

ii. La cola fría por su composición y consistencia física, en primera instancia agrega agua a la mezcla; coalesce rápidamente al realizar la mezcla y genera poco material fino volátil. Luego de desmoldar, resulta una briqueta blanda y moldeable. Al terminar la consolidación de esta briqueta, ésta se encuentra estable, no hay desprendimiento de material al golpearla con una superficie firme, ofrece resistencia al caer de altura (50 cm) y al ser manipulada.

Con la cola fría se obtienen buenos resultados en cuanto a la facilidad de desmoldar y una menor generación de polvo en general. Sin embargo, toma más trabajo distribuir mejor la mezcla, ya que tiende a coalescer al contacto directo con el resto de los componentes de la briqueta, por lo que en la etapa de mezclado es importante que la mezcla alcance la mayor uniformidad posible.

En ese sentido, una proporción mayor de dosificación de este ligante (sobre un 12%) permite que éste pueda distribuirse mejor durante el mezclado. Sin embargo, sobre un 10% de ligante al someter al sólido a compresión para generar la briqueta escurre agua (como excedente), tiene un comportamiento dúctil (altamente deformable) y aumenta el tiempo de consolidación para obtener el producto final.

iii. En el caso del yeso logra obtenerse compacidad en el material de trabajo hasta el briqueteado. Desde el moldeo la briqueta comienza a desarmarse y generar material fino desde la superficie del sólido. Si se compara con la cal, logra consolidarse en tiempos similares; pero al manipular la briqueta se evidencia un comportamiento frágil y baja resistencia a la flexión.

En el caso de aumentar la proporción de ligante en la dosificación al consolidar la briqueta, aunque la resistencia ante la manipulación aumenta, hay desprendimiento de material en la superficie del sólido.

iv. La bischofita inicialmente al mezclarse con la mezcla de pasta virgen y fundentes logra formar rápidamente una masa homogénea y unitaria en comparación con otros ligantes y hay una proporción de material fino que circula durante el mezclado y se reduce luego de un tiempo de mezclado (no más de 5 min pues comienza a ejercer mayor resistencia al mezclar, indicando que comienza a consolidarse o a fraguar.

El principal beneficio es que se moldea con facilidad, pues genera material fino al desmoldar la briqueta desde la matriz y presenta una consistencia blanda mientras no logra fraguar. Al terminar la consolidación de la briqueta, ésta se encuentra estable, al golpearla con una superficie firme se desprende material fino de la superficie, frente a la manipulación tiene resistencia a la flexión.

v. La bentonita durante el mezclado se comporta como el yeso y la cal, en el sentido de que es un material de baja humedad y que presenta una alta proporción de material fino. Esto es más evidente al aumentar la dosificación de este ligante (de 5% a 10%) y se hace difícil llenar el molde de manera uniforme, esto es, distribuir el material fino con la escamilla de fierro y plásticos presentes en la mezcla.

No obstante lo anterior, la briqueta al desmoldar tienen los bordes bien definidos. El principal beneficio es que se moldea con facilidad, pues genera material fino al desmoldar la briqueta desde la matriz y presenta una consistencia blanda. La briqueta producida encuentra estable frente a manipulación reducida, al golpearla con una superficie firme se desprende abundante material fino de la superficie, tiene baja resistencia a la flexión y se parte al caer desde altura de 50 cm. Por esta razón, en ningún ensayo se logra un nivel 3 de conformidad (Con = 3).

vi. El silicato de sodio, al igual que la cola fría, por su composición agrega agua a la mezcla de trabajo. De acuerdo a los ensayos realizados, se alcanza una amplia trabajabilidad durante el mezclado, aunque requiere de tiempo para homogeneizar el material. Una dosificación menor al 10% de aglomerante no permite que se distribuya uniformemente la mezcla.

Pese a la humedad introducida se genera una cantidad apreciable de material fino particulado, presenta una consistencia blanda pero estable tras desmoldar y escurre agua durante el proceso de briqueteado para porcentajes de ligante adicionado mayor al 10%.

Cuando se desmolda la briqueta aún se puede deformar (carácter dúctil). Al ser sometido el sólido generado a manipulación, se verifica que tiene una baja resistencia a la flexión y se desgrana al impactarla con una superficie firme.

Como conclusión, se tiene que los mejores resultados de estabilidad y resistencia de las briquetas se alcanzan con la cal y la cola fría. Los efectos de la cal pueden ser regulados mediante el estrujado, para aumentar la acción de aglomerante y reducir el desprendimiento de material fino que, comparativamente con otros ligantes utilizados, es menor. Si bien con la cola fría hay menor desprendimiento de material fino y prácticamente no se desarma, se tiene que tener particular precaución durante el mezclado para evitar aglomeraciones localizadas de material base con el aglomerante y tampoco adicionar en exceso ya que implica un exceso de humedad a la briqueta final.

Para el caso de otros ligantes, como la bischofita, la bentonita, el silicato de sodio y el yeso, no se consiguen resultados esperables en general. Con el yeso y la bentonita se obtienen briquetas que generan alto material fino y volátil independiente de la presión de briqueteado aplicada y la adición de ligante durante el mezclado. En el caso de la bischofita, logra obtenerse un sólido estable y que tiene resistencia a la flexión aunque con el tiempo logra generar material fino en las aristas y superficie externa. Finalmente, con el silicato de sodio se logran resultados de estabilidad, resistencia a la flexión y una generación reducida de material fino para un porcentaje mayor al 10% en peso, por lo que se introduce una fracción de humedad que no se tiene totalmente determinada ni controlada.

## 5.4 Ensayos de briqueteado en escala productiva

En esta sección se expone un resumen de los resultados de los ensayos realizados para establecer la factibilidad técnica de la aplicación de los siguientes ligantes: cal, cola fría y silicato de sodio y de la respuesta de equipos de proceso, particularmente el proceso de mezclado y briqueteado en escala distinta a la experimental.

Con los equipos y dichos ligantes con los cuales se puede generar productos con alta conformidad (Con = 3) de las briquetas de laboratorio dados los resultados expuestos en la sección anterior, se procede a realizar los ensayos para verificar la estabilidad y resistencia de briquetas sólidas con dimensiones aplicables a una escala productiva, de acuerdo a la metodología establecida en la sección 4.4 de este trabajo.

### 5.4.1 Prueba 1

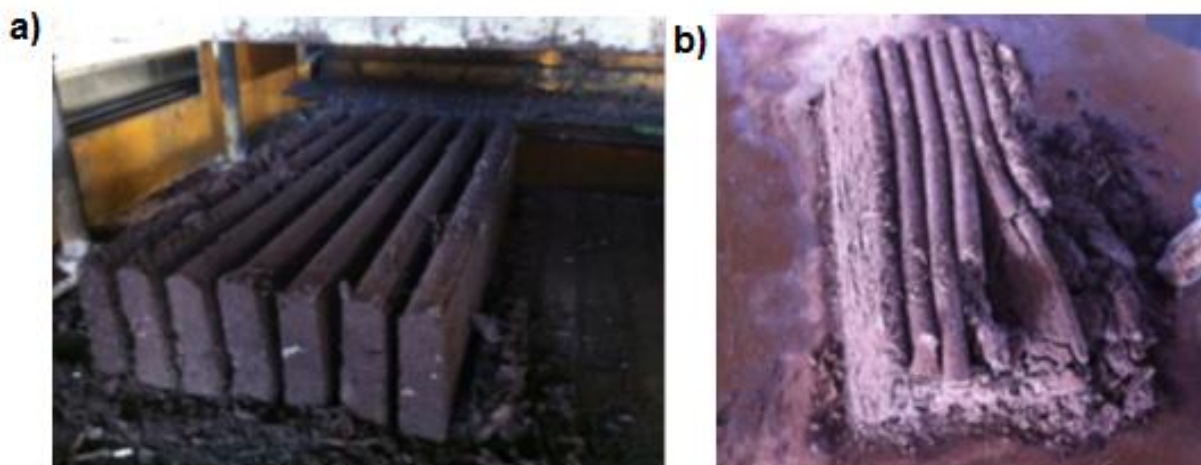
300 kg de mezcla con siguiente composición: i) 7% cola fría; ii) 8% ceniza de soda; iii) 72% pasta con 8% de humedad; iv) 10 % carbón, y v) 10% hierro.

Se agregan 300 kg de mezcla en la tolva del mezclador, se enciende el mezclador, la mezcla no escurre por la tolva y el mezclador no es abastecido con material, por lo que se retira todo el material del mezclador.

### 5.4.2 Prueba 2

300 kg de mezcla con siguiente composición: i) 7% cola fría; ii) 8% ceniza de soda; iii) 72% pasta con 8% de humedad; iv) 10 % carbón, y v) 10% hierro.

Se separa la mezcla, en 15 baldes de 20 kg. Al encender el mezclador se vierten los baldes de a uno.



**Figura 5.18: Conformación de briquetas con cola fría y su evolución con el tiempo: a) luego de producirlas, b) 2 h después de ser moldeadas.**

Se logra realizar el proceso de mezclado para 300 kg. La mezcla se observa homogénea, aunque el material no es suficiente para llenar la ladrillera y se llena la mitad de los bloques de la ladrillera.

Se moldean los bloques (como se muestran en la figura 5.18.a), las briquetas toman forma pero tienen mala consistencia. Una vez que transcurrieron 2 h de haber producido las briquetas, la forma esbelta de los bloques no se mantiene, se deforman y caen (figura 5.18.b).

### 5.4.3 Prueba 3

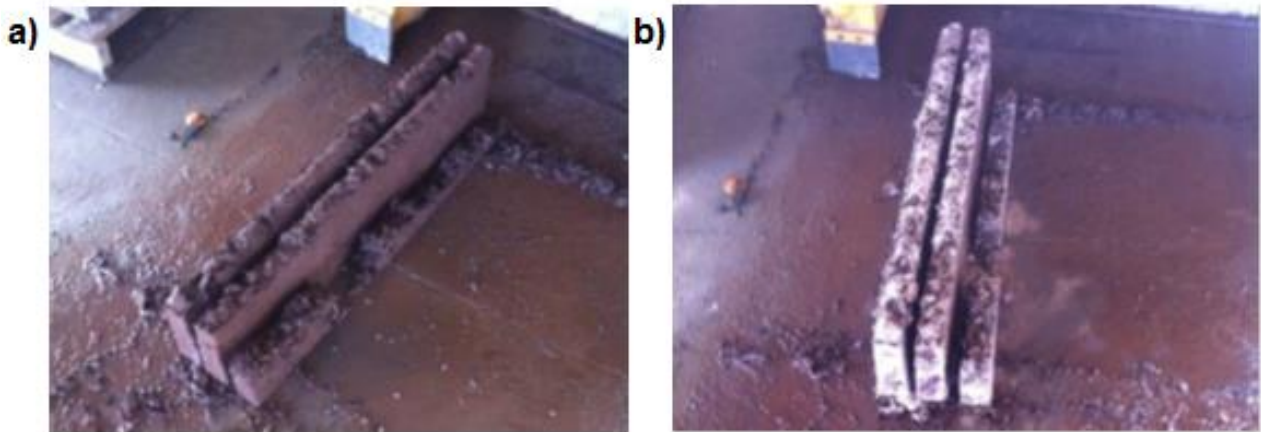
Se realiza el mismo procedimiento para la mezcla para 300 kg de mezcla con siguiente composición: i) 5% cal; ii) 8% ceniza de soda; iii) 72% pasta con 13% de humedad; iv) 10 % carbón, y v) 10% hierro.

Los primeros 150 kg se mezclan correctamente, hasta que se estanca el mezclador por problemas en el tornillo de carga del mezclador. Ante esto, los 150 kg de mezcla son llevados a la máquina ladrillera. Dicha mezcla se observa bastante húmeda, por lo cual se cree que la dosificación manual de cal en el mezclador no fue adecuadamente homogeneizada. Se llenan dos bloques de la máquina ladrillera, como se muestra en la figura 5.19.



**Figura 5.19: Carga manual de dos matrices de la ladrillera.**

Se prensa sin problemas obteniendo bloques con buena consistencia, que se muestran en la figura 5.20.a. La parte superior de los bloques hace contacto y se adhiere parcialmente a la matriz, esto debido a que tiene ésta última una forma de superficie paraboloide (perfil elíptico) y la humedad contenida en la mezcla propiamente tal. En 1 h los bloques tienen excelente consistencia y se mantienen estables, a pesar de su forma esbelta (5.20.b).



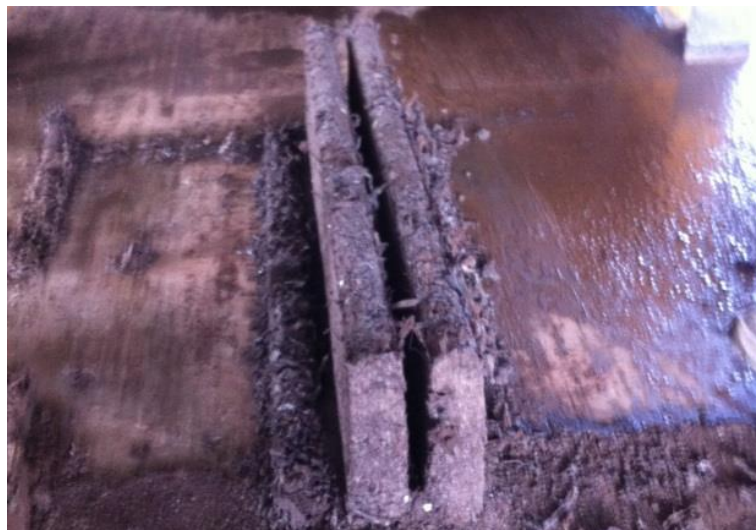
**Figura 5.20: Bloques de mezcla con cal y su evolución en el tiempo; a) luego de producirlas, b) 1 h después de ser moldeadas.**

#### 5.4.4 Prueba 4

Se realizan pruebas con 100 kg de mezcla que tiene la siguiente composición:  
 i) 10% Silicato de sodio; ii) 8% ceniza de soda; iii) 72% pasta con 8% de humedad; iv) 10 % carbón, y v) 10% hierro.

Se emplea un mezclador de paletas para 200 kg de hormigón como el que se muestra en la figura 4.12 de la metodología expuesta en el capítulo 4.4.

Se realiza la mezcla en tandas de 20 kg de pasta, obteniendo una mezcla homogénea, donde se aprecia que el material escurre y se compacta entre las paletas y las paredes del mezclador.



**Figura 5.21: Bloques de mezcla con silicato de sodio.**



Con 100 kg de mezcla se llenan dos bloques de la máquina ladrillera, los cuales se prensan obteniendo la forma del bloque, también se adhiere el material en el contra molde. Una vez desmoldados se obtienen bloques con una consistencia y resistencia más baja que las briquetas producidas con cal; pero que logra permanecer estable y sin desarmarse, como el caso de los productos generados con cola fría como ligante. Dichas briquetas producidas se muestran en la figura 5.21.

#### 5.4.5 Prueba 5

Se repite el mismo procedimiento realizado en la prueba 4, para 100 kg de mezcla con siguiente composición: i) 10% cola fría; ii) 8% ceniza de soda; iii) 72% pasta con 8% de humedad; iv) 10 % carbón, y v) 10% hierro.

Se obtiene un bloque con una consistencia similar a la del primer caso, pero con una apreciable baja en la consistencia y trabajabilidad.

#### 5.4.6 Prueba 6

Se preparan 50 kg de mezcla con siguiente composición: i) 5% Silicato de sodio; ii) 8% ceniza de soda; iii) 72% pasta con 13% de humedad; iv) 10 % carbón, y v) 10% hierro.



**Figura 5.22: Bloque de mezcla con 5% de silicato de sodio y 13% de humedad de la pasta correspondiente a la prueba 6.**

Se genera una mezcla más seca que en el primer caso de la mezcla de PBat con cal como ligante, materializada en un bloque con buena consistencia en el seno de la briqueta; aunque con desprendimiento de material fino en su superficie, lo cual se observa en la figura 5.22.

#### 5.4.7 Prueba 7

50 kg de mezcla con siguiente composición: i) 5% Silicato de sodio; ii) 8% ceniza de soda; iii) 72% pasta con 18% de humedad; iv) 10 % carbón, y v) 10% hierro.



**Figura 5.23: Bloque de mezcla con 5% de silicato y 18% de humedad de la pasta correspondiente a la prueba 7.**

Se obtiene una mezcla muy húmeda, que da lugar a un bloque con buena consistencia, pero se resquebraja debido a una fuerte reacción del aglomerante utilizado en la mezcla, mostrada en la figura 5.23.

#### 5.4.8 Prueba 8

Se realizan pruebas de 100 kg de mezcla con siguiente composición: i) 15% silicato de sodio; ii) 8% ceniza de soda; iii) 72% pasta con 8% de humedad; iv) 10 % carbón, y v) 10% hierro.

Hacia el 50% del ciclo de mezclado se produce un estancamiento del material de trabajo en el interior del mezclador, se destraba y luego se continúa sin problemas. Esto apunta al manejo de carga y la dinámica interna sobre la transición del material durante el mezclado. Se obtiene un bloque muy húmedo, aunque no mejora la consistencia con respecto a la primera prueba con silicato.

Los resultados obtenidos en esta sección apuntan a que es posible conformar briquetas estables en una escala mayor que la de laboratorio, particularmente se obtienen buenos resultados con la cal, ya que tienen buena resistencia a la manipulación y no se desgranar ni se desarman. En el caso de la cola fría y el silicato de sodio no se obtienen buenos resultados porque al briquetear las muestras, desprenden desde la superficie material fino y con el tiempo se desarman, son inestables y no permiten la consolidación de la briqueta, pese a las distintas dosificaciones.

## 5.5. Diseño General de la Planta

Los ensayos realizados han permitido evidenciar los potenciales beneficios del estrujado de la PBat y el proceso de compactación de la briqueta constituida por la pasta virgen, los fundentes (carbón (C), ceniza de soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y escamilla de hierro (Fe)) y el aglomerante (cal, según los mejores resultados obtenidos). Estos beneficios sobre el control de la humedad contenida en el material de trabajo no se tenían claros desde un principio y se establecen de acuerdo a los resultados obtenidos.

Además, se presentaron cambios en la composición original de las briquetas que permitieron mejorar aspectos de trabajabilidad de la mezcla, estabilidad y capacidad de consolidación de las briquetas producidas.

Es así como se identifican 4 fases características del proceso, estas son:

- i. Estrujado,
- ii. Mezclado,
- iii. Briqueteado,
- iv. Secado,

Dicha línea de proceso se ordena en la serie establecida por el diseño conceptual que se muestra en la figura 5.24. En el Anexo A se presenta dicho diseño conceptual como plano correspondiente.

Se considera un proceso de estrujado de la PBat que permite ir reduciendo de manera controlada la humedad con la que entra la pasta virgen y paralelamente se va dosificando las otras especias hacia un mezclador continuo. Esto viene del procesamiento del scrap de baterías, en la primera sección del reciclaje para obtener plomo metálico a partir de las BPA.

Hay que recordar que el flujo de material viene del reciclaje de las BPA, donde los procesos de trituración y circulación se realizan en medios con presencia importante de agua y, por lo tanto, es un elemento de control de humedad desde su ingreso a la línea de procesos. Este flujo de material puede recircular a las secciones de trituración y separación del mismo proceso.

De acuerdo a la acción y trabajabilidad de la mezcla con aglomerante, la adición de éste último puede ser distinta a la que se considera para los elementos fundentes. Particularmente el caso de la cal, el tiempo de reacción y la magnitud del efecto del ligante depende de la cantidad de agua presente en la mezcla.

Por la constitución física (sólido, polvo fino) y respuesta frente al material de trabajo (nivel de agregación al volumen, generación de coalescencias internas), se requiere un nivel de homogeneización y de intervención de los distintos componentes de la briqueta en el mezclador tal, que la dosificación y mecanismo de mezclado (por corte y continuo) sea la adecuada para la producción de briquetas.

A medida que el mezclador va procesando y descargando el material de trabajo, el flujo de material ingresa a la estación de briqueteado y compactado. En este punto se pueden instalar con líneas paralelas de equipamiento, que permitan la generación de las briquetas en función de la tasa de productividad del proceso.

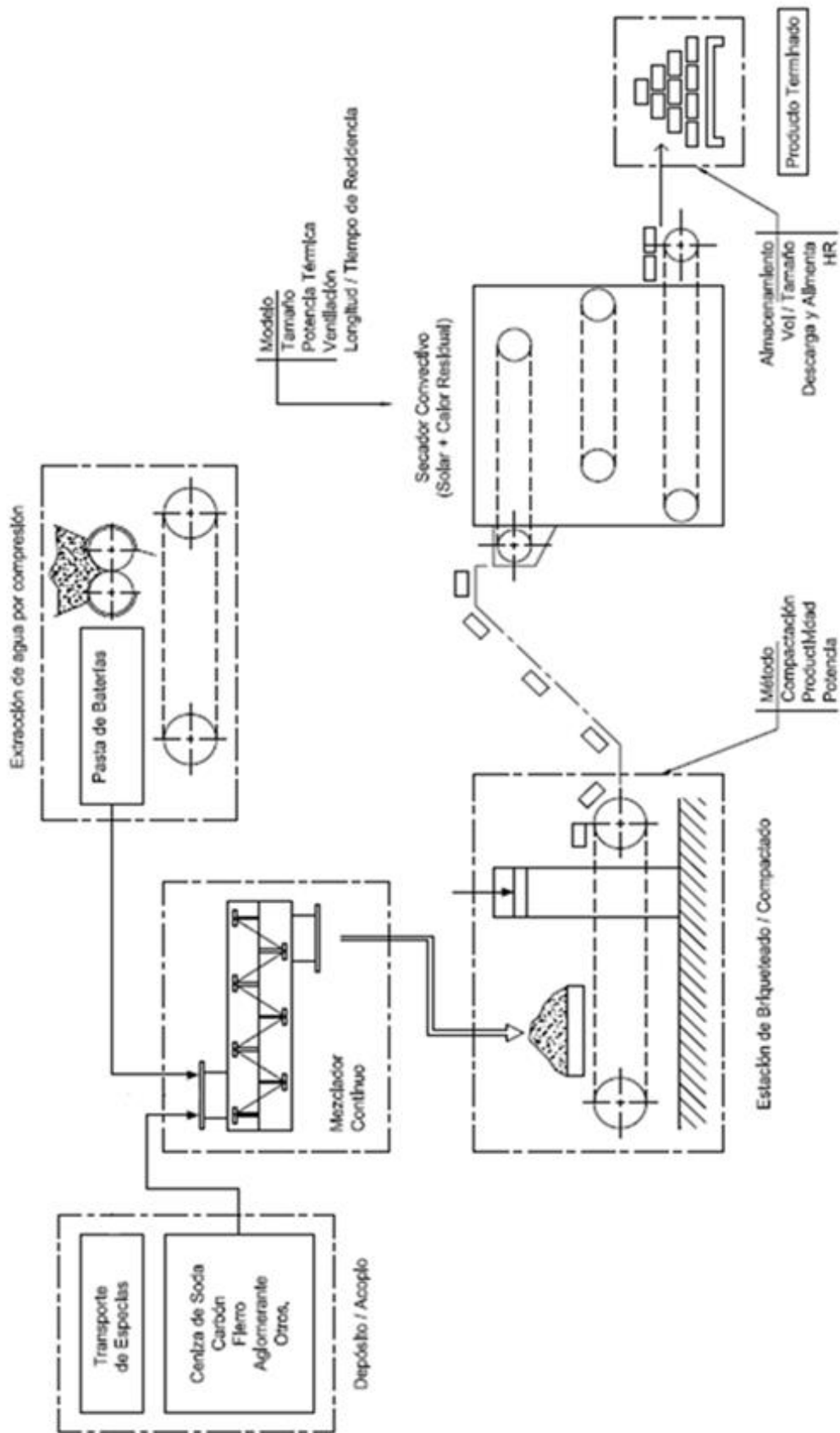


Figura 5.24: Diseño conceptual sección Briqueteado-Secado.

En términos concretos, para evitar pérdidas de eficiencia, el exceso de contacto con el material de trabajo y la reducción de errores en producción, la búsqueda actual de briquetadoras y/o ladrilleras tiende a mecanismos de funcionamiento semi-automáticos. Lo anterior se fundamenta además con la posibilidad efectiva de realizar control de la cantidad y calidad de productos generados y el fraccionamiento del flujo de material de trabajo (mezcla plomada con fundentes y aglomerante) en instalaciones en paralelo de más de un equipo asociado a esta sección.

La estación de briqueteado funciona con el método y tecnología del moldeo por compresión, de modo que se pueda consolidar por medios físicos una geometría determinada el producto fabricado como efecto complementario al que aporta directamente el ligante.

Los productos constituidos durante el briqueteado son transportados a un secador convectivo alimentado con calor residual de procesos (según las posibilidades planteadas desde la planta, aunque se requiera de alimentación complementaria si corresponde), de modo que se reduzca la humedad remanente alojada en las briquetas. Esto se proyecta como un secador continuo que permita el transporte de al menos 1 h, pues durante este plazo se desarrolla la mayor tasa de remoción de humedad, de acuerdo a las curvas de secado obtenidas.

Las briquetas que pasaron por el secador son capturadas y almacenadas a la salida del horno para ser procesadas posteriormente en la planta de refinación del metal plomado.

La zona de interés de este trabajo en la línea de producción se representa en flow-sheet de la figura 5.25. En ella se procesa un flujo de material que corresponde a la mezcla del material base (PBat), fundentes y aglomerantes desde el mezclador. Una propuesta esquemática se presenta como anexo al final de este documento. Un esquema de la propuesta se aprecia en detall en el Anexo B de este trabajo.

En dicho diagrama, se considera un tiempo de residencia máximo a 5 min en mezclador. También se precisan algunas consideraciones como tener briquetadoras en paralelo para distribuir de manera adecuada el material de trabajo y la respectiva capacidad de carga de cada prensa.

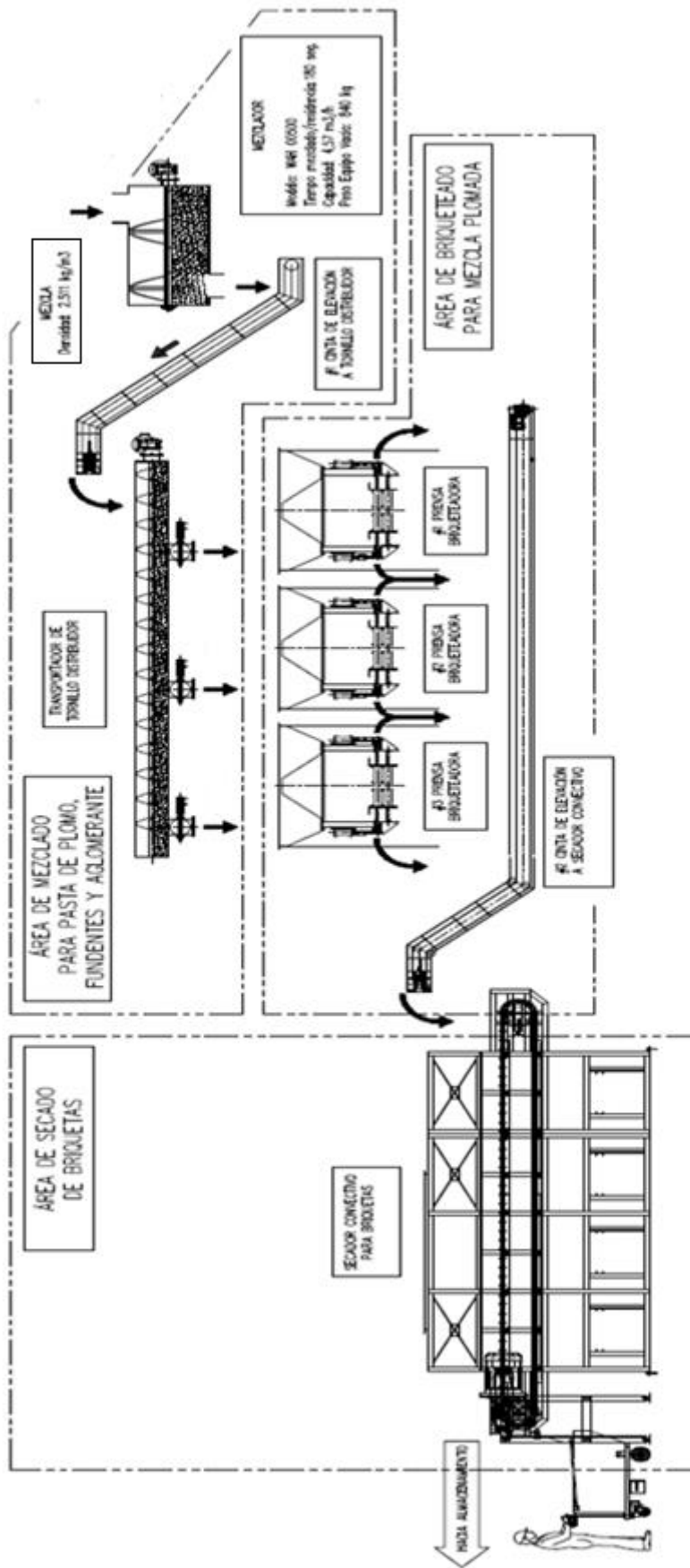


Figura 5.25: Flow-sheet sección Briqueteado-Secado.

## 5.6. Especificación de Procesos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos y de la línea de procesos establecida en la sección 5.5 de este trabajo, en la tabla 5.7 se exponen los principales componentes del procesamiento de material plomado que permiten dar una estructura por etapas, establecer un mínimo grado de especificación y constituir los valores y/o rangos de parámetros referenciales de los procesos considerados en la generación de briquetas a partir de PBat.

**Tabla 5.7 Parámetros de Procesos de Briqueteado.**

Componente o Proceso	Comentarios
Material Base	PBat triturada, con un porcentaje de humedad no mayor al 20% en peso, correspondiente al 72% del material antes de mezclar.
Estrujado de Material Base	Presión a aplicar de 30 kg/cm <sup>2</sup> , de modo que se obtenga pasta base con humedad límite de hasta un 8% en peso.
Fundentes	Escamilla de fierro, ceniza de soda y carbón con una proporción respectiva de 10%, 8% y 10% en peso respecto de la mezcla antes de incorporar el aglomerante.
Aglomerante	Se considera a la cal como aglomerante, con un porcentaje de adición de 7% en peso respecto de la mezcla (material base y fundentes incluida).
Mezclado	Según las proporciones, ingresar elementos de manera de generar una mezcla distribuida, con un tiempo de residencia en el mezclador menor a 10 minutos por estabilización y trabajabilidad de la mezcla.
Briqueteado	Se considera un nivel de presión de compactación aplicada entre 10 y 20 kg/cm <sup>2</sup> para poder estructurar el producto final y que no represente un gasto excesivo de energía. Se considera la tecnología de moldeo por compresión en esta fase para la estabilidad del sólido. Con equipamiento que permita dicha transformación en línea continua respecto del procesamiento.
Secado	Los valores utilizados muestran una temperatura en secado convectivo no superior a 120°C, con una velocidad de flujo máxima de 1 m/s.

## **6. Evaluación de Pre-factibilidad de la línea de procesos**

En este capítulo se desarrolla una evaluación general sobre la factibilidad técnica y económica que representa este proyecto de innovación tecnológica a una sección de la planta de procesamiento de PBat, respecto de los resultados obtenidos y del procesamiento planteado en este trabajo.

En la sección 6.1 se discuten algunos alcances sobre la tecnología involucrada en la nueva línea de procesos, de acuerdo a los resultados de los ensayos expuestos anteriormente en este trabajo. En la sección 6.2 se aborda las consideraciones de estimación de costos e inversión para realizar una evaluación económica marginal y en la sección 6.3 los resultados centrados en la elaboración de flujo de caja e indicadores económicos.

### **6.1 Factibilidad Técnica de la unidad**

Respecto a la factibilidad técnica se establece que, por los resultados a la fecha, no hay riesgo tecnológico elevado respecto a los planteamientos de cambio asociados a este trabajo. Esto se fundamenta en que se logra configurar un sólido compacto a partir de los materiales otorgados por la planta, esto es, la materia prima y los fundentes, además de la dosificación fijada en las mediciones y desarrollos experimentales que se realizan en contexto de laboratorio (verificación de resultados altamente probable y generación de muestras principalmente) y en escala productiva, según los resultados obtenidos del capítulo anterior de este trabajo.

Durante los ensayos se evidencia el efecto importante de la gestión de humedad respecto a la PBat, ya que condiciona la estabilidad del compacto. En ese sentido, el proceso de estrujado puede llevarse a cabo ya que hay que considerar principalmente una prensa que se adecúe al flujo de material y los niveles de presión planteados.

De manera preliminar incluso la sección de secado toma un rol secundario para la reducción de la humedad como consecuencia de la compresión del material. El secado de la briqueta puede tener beneficios principalmente en el último estado de preparación de material antes de la fundición, respecto de la humedad alojada en el seno del compacto.

Surge una precaución particular respecto del mezclador con la referencia que se adquirió con los ensayos de escala productiva. La solución de este punto tiene que ver con el control de la capacidad del material, viendo la posibilidad de tener dos o más equipos en paralelo en caso de ser necesario. Así también la homogeneidad de la mezcla queda marcada también por el mecanismo de mezclado, principalmente rotativo con ayuda de espas y/o cuchillas en un medio seco.

Si bien el proceso propuesto corresponde a una innovación tecnológica, está basado en equipamientos existente en el mercado, en conjunto con el nivel experiencia adquirido y establecido en referencias, literatura asociada y normativas correspondientes. Esto lleva a concluir que se tiene un manejo de la incertidumbre respecto al proceso y, por lo tanto, este proyecto es factible técnicamente.



## 6.2 Consideraciones para la Factibilidad Económica de la unidad

Para evaluar el proyecto se hizo un análisis marginal, considerando escenarios sin y con proyecto productivo.

La hipótesis de trabajo para esta evaluación es obtener y/o cuantificar el impacto que genera la reducción de material plomado con un funcionamiento más limpio, con menos personas durante la operación y una utilización menor de energía.

Dentro de las condiciones de evaluación, hay que hacer notar que los ingresos propios de la industria del reciclaje provienen de la venta de commodities que fijan el precio del plomo metálico de alta pureza en el mercado (según la bolsa de metales de Londres, LME). En este caso, el precio de venta del plomo corresponde a \$1.128,82 por kilo si se toman los valores promedios del mes de febrero y marzo del presente año [18, 19].

Se establece el peor escenario de evaluación, lo cual significa mantener la misma tasa de producción, con una humedad representativa de la carga con la que entran las briquetas del 18%, manteniendo el nivel de producción de 50 ton diarias de plomo para una jornada de trabajo de 20 h. Además, el requerimiento extra de energización eléctrica para la briqueteadora, el transporte por cintas y una bomba de circulación de aceite térmico para traspasar la energía desde el sistema térmico de la planta (caldera o generador de calor complementario dentro del proceso) al aire de secado.

La proyección de los costos se hace en función de los datos obtenidos de la planta, cuyo desglose para el caso sin proyecto corresponde a un 70% asociado al costo variable de la operación (centrada en los consumos de energía) y el resto se reparte en un 20% para costos fijos (personal) y 10% por consideraciones administrativas y de gestión de ventas.

Se plantea un financiamiento por el total de la inversión considerada, mediante un préstamo a 5 años plazo con una tasa de interés anual del 15%. Además de la depreciación de activos para el horizonte considerado. En esa dirección, lo que se hace es construir el flujo de caja de la situación sin proyecto de cambio tecnológico en base a los datos de la planta.

Luego se considera la situación con proyecto, lo cual implica considerar inversiones en equipamiento, obras y capital de trabajo que se exponen en las tablas 6.1 a 6.4.

El proyecto contempla una inversión de \$161.298.850 donde se consideran los siguientes componentes, los que son explicados a continuación:

- i. Ingeniería de detalle.
- ii. Adquisición de equipos.
- iii. Internación y traslado de equipos.
- iv. Piping, control electrónico y obras civiles.
- v. Puesta en marcha y pruebas.

**Tabla 6.1 Inversiones en desarrollo de Ingeniería.**

Ítem	Cantidad	Unidad	Costo unitario \$	Costo \$
Diseño de planta	3	Mes	1.000.000	3.000.000
Secador	3	Mes	1.000.000	3.000.000
Diseño Obras civiles	3	Mes	1.000.000	3.000.000
Planos de ingeniería	3	Mes	1.000.000	3.000.000
Adquisición de equipos	3	Mes	1.000.000	3.000.000
<b>Total General Ingeniería</b>				<b>15.000.000</b>

Para realizar el cálculo de costos de los equipos, se realiza una búsqueda y cotizaciones asociadas que respondieran a los requerimientos de procesos establecidos. Por ejemplo, para el mezclador se toma en cuenta referencias de catálogos de mezcladores continuos (Wamgroup), prensa para producir briquetas de manera manual y semi-automática (Menegotti, Komarek [20]). En el caso del secador y cintas de transporte, hay montos y referencias típicas para su estimación, así como el desarrollo de Ingeniería y las Obras Generales.

**Tabla 6.2 Inversiones en Tecnología y Equipamientos de la planta.**

Ítem	Cantidad	Unidad	Costo unitario \$	Costo \$
<b>1. Briqueteadora</b>				
Prensa briqueteadora de 7,5 kW 150 t. FOB	1	un	7.581.480	7.581.480
Empaque	5%	-	7.581.480	379.074
Transporte a Valparaíso	50%	-	7.581.480	3.790.740
Transporte a la planta	3	t	150.000	450.000
Montaje instalación	3	t	1.500.000	4.500.000
<b>Total Briqueteadora</b>				<b>16.701.294</b>
<b>2. Sistema de secado</b>				
Secador de curado 43 m <sup>3</sup> con cinta de suministro	1	un	0	0
Caldera 3 MWt función Diesel/Gas	1	un	52.908.373	52.908.373
Bomba de circulación de 11 kW <sub>e</sub>	1	un	3.355.226	3.355.226
Piping	5%	-	56.263.599	2.813.180
Instalación	1	un	3.000.000	3.000.000
Puesta en marcha	1	un	1.000.000	1.000.000
Pruebas hidráulicas	1	un	1.000.000	1.000.000
<b>Total Sistema de secado</b>				<b>64.076.779</b>
<b>3. Cinta transportadora</b>				
Cinta transportadora 8 t/h	4	m	1.000.000	4.000.000
Montaje instalación	1	t	1.500.000	1.500.000
<b>Total Cinta transportadora</b>				<b>5.500.000</b>
<b>Total General Tecnología y Equipamiento</b>				<b>86.278.073</b>

**Tabla 6.3 Inversiones en desarrollo de Obras Generales y Puesta en marcha.**

Ítem	Cantidad	Unidad	Costo unitario \$	Costo \$
<b>1. Obras Generales</b>				
Obras Civiles	10%	-	121.768.346	12.176.835
Control	10%	-	121.768.346	12.176.835
Piping	10%	-	121.768.346	12.176.835
<b>2. Puesta en marcha</b>				
Puesta en marcha	1	un	1.000.000	1.000.000
Calibración del sistema de control	1	un	1.000.000	1.000.000
Pruebas de operación	1	un	1.000.000	1.000.000
<b>Total General Obras Generales</b>				<b>39.530.504</b>

**Tabla 6.4 Resumen de Inversión.**

Listado de inversión	Costo Total \$
Total General Tecnología y Equipamientos	106.768.346
Total General Desarrollo de Ingeniería	15.000.000
Total General Desarrollo de Obras Generales	39.530.504
<b>Total Inversiones</b>	<b>161.298.850</b>

Se dispone de la información energética de consumo necesaria para la evaluación del proyecto, en complemento se dispone los costos económicos unitarios para la evaluación económica.

**Tabla 6.5 Costo unitario de consumo de insumos.**

Insumo	Cantidad	Unidad
Petróleo	423.000	CLP/m <sup>3</sup>
Oxígeno	130.205	CLP/m <sup>3</sup>
Electricidad	75	CLP/kWhe

**Tabla 6.6 Costos anuales de energía sin proyecto.**

Sin proyecto	Cantidad	Unidad	Costo \$
Consumo de petróleo	785	m <sup>3</sup>	331.868.741
Consumo de oxígeno	2.048	m <sup>3</sup>	266.620.875
<b>Total Costos de Energía</b>			<b>598.489.616</b>

Las tablas 6.5 y 6.6 indican los valores respecto a los costos unitarios por consumo promedio de petróleo y oxígeno que alimenta al horno rotatorio, para realizar el procesamiento de las briquetas posterior al secado, de acuerdo a los datos aportados por la planta. En el caso de las tablas 6.7 y 6.8 se consideran los valores afectados por el consumo de menores insumos del horno rotatorio producto de la implementación de la modificación de la línea de procesamiento, tal y como se especifica al inicio de este capítulo.

**Tabla 6.7 Costos anuales de energía con proyecto.**

Con proyecto	Cantidad	Unidad	Costo \$
Consumo de petróleo	335	m <sup>3</sup>	141.549.582
Consumo de oxígeno	873	m <sup>3</sup>	13.719.880
Energía eléctrica	152	MWhe	11.426.400
<b>Total Costos de Energía</b>			<b>266.695.863</b>

**Tabla 6.8 Costos Fijos anuales con proyecto.**

Ítem	Cantidad	Unidad	Costo Unitario \$	Costo Anual \$
Operadores				
Jefe de operación	12	mes	2.000.000	24.000.000
Operador	12	mes	800.000	9.600.000
Mantenición				
Mantenición	10%	-	121.768.346	12.176.835
Repuestos	2%	-	121.768.346	2.435.367
Total Operadores				33.600.000
Total Mantenición				14.612.202
<b>Total General</b>				<b>48.212.202</b>

### 6.3 Resultados de la evaluación de Factibilidad Económica de la unidad

Se estiman los flujos de caja en la situación actual de producción (situación sin proyecto) y luego se proyecta el caso de aplicar la inversión previamente establecida, conformando la línea de procesos.

A partir de ambos escenarios (con y sin proyecto de innovación tecnológica), se obtiene el flujo de caja marginal respecto a ambas situaciones, con el cual se determina el VAN con una tasa de descuento del 12%, la tasa interna de retorno (TIR) respectiva de los flujos y el período de retorno de la inversión (PRI) dentro de un horizonte de 10 años de evaluación. Esto se ve reflejado en los flujos de caja correspondientes a las tablas 6.9, 6.10 y 6.11.

**Tabla 6.9 Flujo de caja bajo situación actual sin proyecto.**

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos											
Producción (ton/año)		18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500
Precio (M\$/ton)		1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
<b>Ingresos totales (M\$)</b>	0	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18
Egresos											
Costos Fijos		-171,00	-171,00	-171,00	-171,00	-171,00	-171,00	-171,00	-171,00	-171,00	-171,00
Costos Variables		-598,49	-598,49	-598,49	-598,49	-598,49	-598,49	-598,49	-598,49	-598,49	-598,49
Administración por ventas		-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85
<b>Egresos totales (M\$)</b>	0	-829,34	-829,34	-829,34	-829,34	-829,34	-829,34	-829,34	-829,34	-829,34	-829,34
Inversión											
Proyecto											
Inicio de operaciones											
Reposición de equipos											
<b>Inversiones totales (M\$)</b>	0										
<b>Flujo de caja neto (M\$)</b>	0	20.053,84	20.053,84	20.053,84	20.053,84	20.053,84	20.053,84	20.053,84	20.053,84	20.053,84	20.053,84

**Tabla 6.10 Flujo de caja bajo situación actual con proyecto.**

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos											
Producción (ton/año)		18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500	18.500
Precio (M\$/ton)		1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
<b>Ingresos totales (M\$)</b>	0	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18	20.883,18
Egresos											
Costos de Fijos		-122,80	-122,80	-122,80	-122,80	-122,80	-122,80	-122,80	-122,80	-122,80	-122,80
Costos de Variables		-266,70	-266,70	-266,70	-266,70	-266,70	-266,70	-266,70	-266,70	-266,70	-266,70
Administración por ventas		-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85	-59,85
Depreciación		-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51
<b>Egresos totales (M\$)</b>	0	-449,35	-449,35	-449,35	-449,35	-449,35	-449,35	-449,35	-449,35	-449,35	-449,35
Inversión											
Proyecto	-106,77										
Inicio de operaciones	-54,53										
Reposición de equipos											
<b>Inversiones totales (M\$)</b>	-161,30										
Depreciación		14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51
<b>Flujo de caja neto (M\$)</b>	-161,30	20.433,84	20.433,84	20.433,84	20.433,84	20.433,84	20.433,84	20.433,84	20.433,84	20.433,84	20.433,84

**Tabla 6.11 Flujo de caja marginal.**

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos											
Producción (ton/año)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Precio (M\$/ton)		1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
<b>Ingresos totales</b>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Egresos											
Costos de Fijos		48,20	48,20	48,20	48,20	48,20	48,20	48,20	48,20	48,20	48,20
Costos de Variables		331,79	331,79	331,79	331,79	331,79	331,79	331,79	331,79	331,79	331,79
Administración por ventas		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciación		-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51	-14,51
<b>Egresos totales</b>		365,48	365,48	365,48	365,48	365,48	365,48	365,48	365,48	365,48	365,48
Inversión											
Proyecto	-106,77										
Inicio de operaciones	-54,53										
Reposición de equipos											
<b>Inversiones totales</b>	-161,30										
Depreciación		14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51
Recuperación de la Inversión	-161,30	218,69	598,69	978,68	1.358,67	1.738,66	2.118,66	2.498,65	2.878,64	3.258,64	3.638,63
<b>Flujo de caja neto</b>	-161,30	379,99	379,99	379,99	379,99	379,99	379,99	379,99	379,99	379,99	379,99

Los resultados de la evaluación económica son los siguientes:

- i. Se obtiene un VAN al 12% de \$1.773 millones.
- ii. Una tasa interna de retorno del 236%.
- iii. El periodo de recuperación de la inversión (PRI) es inferior a un año de operación post-inversión.
- iv. Se evidencia que hay un ahorro sostenido en el tiempo debido a la reducción de recursos en un monto de \$379.992.753. Además, dicho ahorro permite el pago de las inversiones, pues establece un margen relevante respecto a las inversiones y/o costos adicionales.
- v. El principal impacto de la inversión se traduce en las variaciones del costo variable por concepto del ahorro de consumo energético requerido en la línea de procesos y el costo fijo de la operación del proyecto ligada a la reducción de personal (y costos asociados) por la inclusión de la nueva tecnología.

La tabla 6.12 considera el análisis de sensibilidad bajo un par de condiciones factibles para la realización del proyecto. Hay que considerar que los flujos netos representan directamente ahorros por costos de operación, reportándose en dinero el impacto que se genera con el cambio de tecnología.

**Tabla 6.12 Análisis de sensibilidad para evaluación marginal.**

Indicadores	VAN(12%)	TIR	PRI
Caso Base	\$ 1.772.986.567	235,58%	1
Aumento Inversión en 200%	\$ 1.484.952.906	78,29%	1
Reducción Ahorro Costo Variable a 25%	\$ 517.601.273	81,09%	2

Para el primer caso, el aumento de inversión refleja la baja influencia que acarrea el monto de inversión frente al flujo marginal de ahorros, pues el VAN proyectado tiene una reducción del 16,25%. En el segundo caso, las variaciones en el costo variable afectan de manera considerable el VAN proyectado en el horizonte de tiempo y se entiende que éste es el principal beneficio al realizar este proyecto de innovación en la tecnología del proceso. Dicha reducción de ahorro significa una reducción del VAN de 70,81% además de retrasar el periodo de recuperación de la inversión en un año más.

En el caso de estudio el proyecto supera las exigencias económicas de VAN positivo, TIR > al 12% y PRI menor a los 10 años de horizonte de proyección. Con estos resultados se concluye que el proyecto en general es factible económicamente. Se evidencia la apreciable sensibilidad respecto a los costos variables considerados en la evaluación es más relevante que el incremento de la inversión, pues impacta considerablemente el VAN calculado.

Considerando las pruebas de mezclado, prensado y secado y que el proyecto efectivamente trae consigo una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, se concluye que el proyecto es también factible técnicamente en el caso planteado.

## 7. Conclusiones

El informe muestra el progreso de estudios iniciales para desarrollar técnicas de consolidación de PBat, empleadas en el proceso productivo de reciclaje de plomo, poder obtener valores referenciales de los parámetros para el secado del material; con la finalidad de identificar los requerimientos de proceso y de energía a escala industrial.

Respecto al desarrollo del diseño conceptual, los ensayos realizados han podido establecer los principales equipos del proyecto, permitiendo generar el esquema de procesos descriptivo de la solución.

Empleando muestras de productos provenientes de planta se desarrolló un programa preliminar de procesamiento y análisis, incluyendo las siguientes evaluaciones:

- i. Caracterización y secado anhidro de PBat.
- ii. Preparación de mezclas conteniendo la formulación completa que va a briqueteado.
- iii. Determinación de ligante para briquetas.
- iii. Ensayos de consolidación y secado de briquetas.

La densidad Anhidra de la PBat, obtenida a 120°C & 60 h en horno, es de 2.156 kg/m<sup>3</sup>. Lo cual indica que el contenido medio de agua libre es típicamente del 18 al 20% en base húmeda, según la caracterización realizada.

Durante pruebas de consolidación de mezclas, empleando técnicas de extrusión y de moldeado, se verificó que la PBat no es posible someterlas a extrusión, independiente del nivel de presión y contenido de agua. Es por esto que, el trabajo de consolidación posterior se basa en experiencias de moldeado y briqueteado.

Respecto a los ensayos de secado convectivo de briquetas, en un intervalo exploratorio de las variables de 40-80 °C y velocidad de flujo de aire de 1-5 m/s. Se verifica que, en briquetas que presentan una alta relación de superficie/volumen (SV), se alcanza el estado de equilibrio en tiempos de ciclo de e 0,75 a 1 h.

Para determinar las especificaciones de los procesos involucrados, se condujeron ensayos para definir los componentes de la briqueta, en particular utilizar cal como ligante. En estos ensayos se comprueba que la incorporación de humedad, tras estrujado de la PBat (adición no superior al 7% en peso de la carga de mezcla a base de PBat) permite mejorar la trabajabilidad de la masa para la fase de mesclado.

Durante el proceso de estrujado, a una presión de 30 kg/cm<sup>2</sup>, se llega a una pérdida de masa de 7% - 9%, que incluye agua principalmente y material fino, previo al proceso de briqueteado. El aporte realizado por este proceso para la pérdida de humedad presente en las briquetas, en términos de porcentaje efectivo retirado, permite establecer que el secado propiamente tal no es una sección primordial para el cumplimiento final del proceso. En ese sentido, la decisión de implementar el secado

por las escalas desarrolladas en este trabajo se establece como una opción abierta a su desarrollo.

Las posteriores modificaciones en cuanto a la composición de la briqueta llevan a establecer que además de la adición de aglomerante se recomienda algún grado de compactación durante el moldeado, limitado a un máximo de  $20 \text{ kg/cm}^2$ , para no sobre-dimensionar y aportar consumo extra de energía.

Respecto a las pruebas realizadas en escala productiva, se tiene que el mezclado por paletas funciona de buena manera, obteniendo mezclas homogéneas, lo cual indica que es importante el dimensionamiento de los equipos a emplear con el material, sobre todo el mezclador porque representa un elemento sometido a actividad y desgaste permanente.

La máquina ladrillera sirve para el proceso, considerando un reacondicionamiento respecto a levantar la estructura para pasar un sistema de transporte de las briquetas que se prensan y agregar dispositivos de control del sistema hidráulico, sobre todo para conocer la presión de trabajo.

Se verifica que las proporciones y dosificaciones proyectadas a partir de los ensayos de laboratorio son las aptas para generar briquetas de mayor dimensión, como proceso de consolidación y estabilidad de éstas.

En el caso de estudio de factibilidad técnico-económica, el proyecto supera las exigencias económicas bajo condiciones de operación actuales, incluyendo las inversiones de equipamiento y obras generales necesarias, además de los ahorros asociados al consumo de petróleo, oxígeno del horno rotatorio debido a la gestión de la humedad. La tecnología y equipamientos a emplear están probados en distintas experiencias, pues son elementos provistos por el mercado. Esto se traduce en una baja incertidumbre frente a la previsión de problemas o fallas respecto del diseño en general.

El análisis de la factibilidad económica muestra que se requiere una inversión de \$161.298.850 para desarrollar la línea de procesamiento, incluyendo equipo e instalaciones. El proceso genera reducciones de costos fijos y costos variables del orden del 47% con respecto a la operación actual, con lo cual la evaluación marginal del proyecto a 10 años tiene un VAN al 12% de \$1.772.986.567, la TIR de 236% y una recuperación de la inversión al primer año de implementar las mejoras tecnológicas. Con estos resultados se concluye que el proyecto en general es factible técnica y económicamente.



## Bibliografía

- [1] Datasheet referencial del sitio Matweb, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ebd6d2cdfdca4fc285885cc4749c36b1&ckck=1>
- [2] 'Evolution of an Element', Publicación de la ILA (International Lead Association), (2013), <http://www.ila-lead.org/publications>
- [3] Vest H. 'Fundamentals of the Recycling of Lead-Acid Batteries' (2002).
- [4] Madías J., 'Reciclado de Barros y Polvos de Acería al Oxígeno', Acero Latinoamericano, (2011)
- [5] Núñez L., Rojas G., 'Ingeniería de Perfil: Planta de Cogeneración ORC para Producción de Oxígeno de Proceso y Apoyo de Secado de Materia Prima', Proyecto con Cofinanciamiento de Estudios de Factibilidad para Proyectos de Cogeneración en la Industria, AChEE, Innovatec, (2013).
- [6] GEANKOPLIS, C. J. "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias". Editorial CECSA. 3era edición. México (1998).
- [7] TREYBAL, R. "Operaciones de Transferencia de Masa". Mc Graw Hill. México, (1988).
- [8] Imagen editada del sitio web del curso de C. Orrego, Procesamiento de Alimentos, [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/lecciones/cap7/leccion7\\_6.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/lecciones/cap7/leccion7_6.htm)
- [9] Catálogo de secadores de bandeja en Powder System <http://mediacentres.es.powdersystems.com.s99628.gridserver.com/?p=308>
- [10] Imagen editada del sitio web, Catálogo de Máquinas Secadoras, <http://www.chinadrier.es/1-mesh-belt-dryer-1.html>
- [11] Imagen editada del sitio web, Catálogo de Máquinas Secadoras, <http://www.chinadrier.es/1-mesh-belt-dryer-5.html>
- [12] Directrices Sobre Mejoras Técnicas Disponibles y Orientación Provisional Sobre Mejoras Prácticas Medioambientales [Ginebra]: Secretaría del convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes, (2007).
- [13] Núñez L. et al 'Estudio de Pre-factibilidad para la Incorporación de Procesos de Briqueteado y Secado de Pasta de plomo en Operaciones Productivas de la Planta', Proyecto con Cofinanciamiento de Estudios de Eficiencia Energética para Proyectos y procesos en Fase de Diseño (2014).
- [14] Alvarado A., 'Análisis de métodos para el estudio granulométrico de áridos de mezclas asfálticas', Trabajo de Titulación (2011).

[15] Referencia explicativa para selección de serie de tamaño de malla Norma Chilena 165 OF 77, Publicación de Universidad Católica del Norte <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/TamizT3.htm>

[16] Referencia explicativa análisis genérico de áridos, Publicación de Universidad Católica del Norte <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/ciencia5.htm>

[17] Imagen editada del sitio web, Catálogo de Mezclador Mortero, [http://www.menegotti.ind.br/menmaq/produto/linha-de-betoneiras-e-misturadores/misturador-de-argamassa-200l.html?\\_\\_store=espanhol&\\_\\_from\\_store=0](http://www.menegotti.ind.br/menmaq/produto/linha-de-betoneiras-e-misturadores/misturador-de-argamassa-200l.html?__store=espanhol&__from_store=0)

[18] Sitio web para reporte del London Metal Exchange (LME) para precio del plomo año 2015, <http://www.lme.com/metals/reports/averages/>

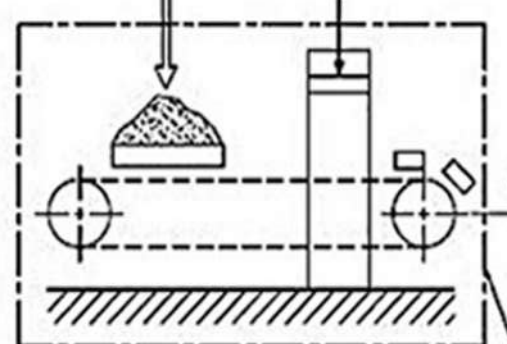
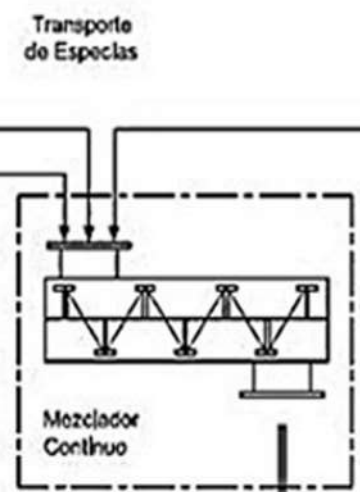
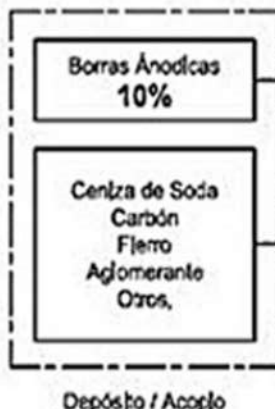
[19] Sitio web referencial para el valor del dólar correspondiente a la evolución año 2015, <http://www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2015.htm>

[20] Maquinaria de compactación y briqueteadora en sitio web <http://www.komarek.com/briquette-solutions.html>

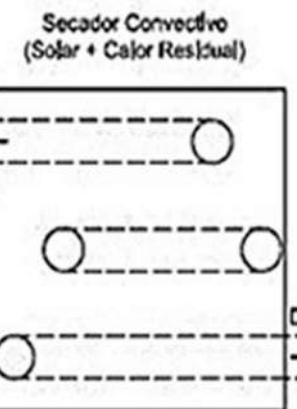
## **Anexos**

Anexo A: Diseño Conceptual de Línea de procesos para Tratamiento y Generación de briquetas de PBat.

Anexo B: Flowsheet Línea de Procesos de Briqueteado y Secado (B-S) de briquetas de PBat.



Método  
Compactación  
Productividad  
Potencia

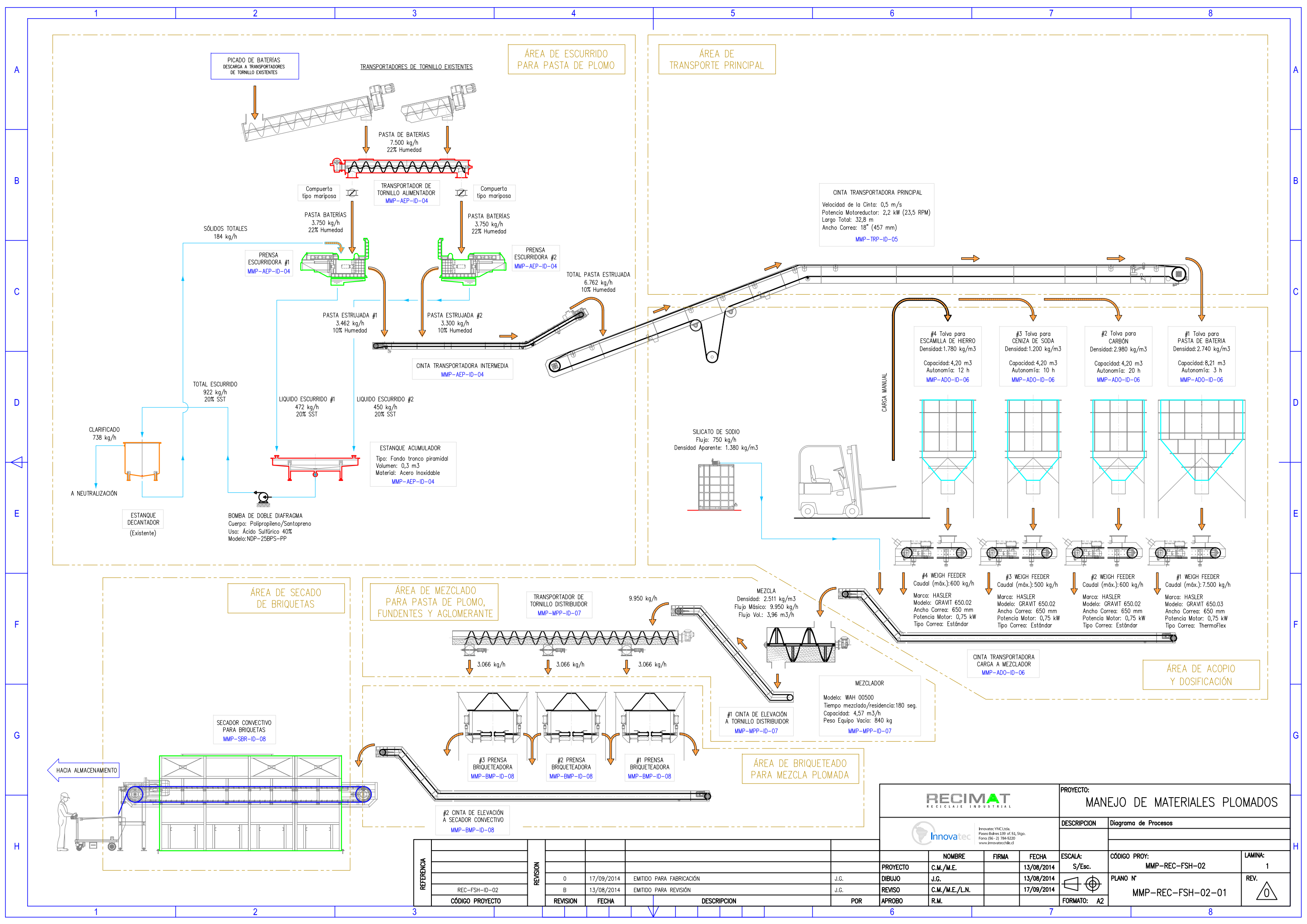


Almacenamiento  
Vol / Tamaño  
Descarga y Alimenta  
HR



Modelo  
Tamaño  
Potencia Térmica  
Ventilación  
Longitud / Tiempo de Residencia

				<b>PROYECTO:</b> Planta de Briqueteado y Secado de Pasta de Pb			
				<b>DESCRIPCIÓN:</b> Diagrama de Proceso			
				<b>ESCALA:</b>		<b>ARCHIVO:</b> REC-BSP-P&ID-01	<b>LÁMINA:</b> 1
<b>PROYECTO</b> LN		<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b> 29/01/2014		<b>PLANO N°</b> REC-BSP-P&ID-01-01		
<b>DBUJO</b> JG			29/01/2014				
<b>REVISO</b> LN			29/01/2014				
<b>APROBIO</b> LN							



**ÁREA DE ESCURRIDO PARA PASTA DE PLOMO**

**ÁREA DE TRANSPORTE PRINCIPAL**

**ÁREA DE MEZCLADO PARA PASTA DE PLOMO, FUNDENTES Y AGLOMERANTE**

**ÁREA DE SECADO DE BRIQUETAS**

**ÁREA DE BRIQUETEADO PARA MEZCLA PLOMADA**

**ÁREA DE ACOPIO Y DOSIFICACIÓN**

				<b>PROYECTO: MANEJO DE MATERIALES PLOMADOS</b>			
				<b>DESCRIPCION: Diagrama de Procesos</b>			
PROYECTO	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ESCALA:	CÓDIGO PROY:	LAMINA:	
DIBUJO	C.M./M.E.		13/08/2014	S/Esc.	MMP-REC-FSH-02	1	
REVISO	J.G.		13/08/2014		PLANO N°	REV.	
APROBO	C.M./M.E./L.N.		17/09/2014		MMP-REC-FSH-02-01	0	
	R.M.			FORMATO: A2			

REFERENCIA	REVISION	FECHA	DESCRIPCION	POR
	0	17/09/2014	EMITIDO PARA FABRICACIÓN	J.G.
	B	13/08/2014	EMITIDO PARA REVISIÓN	J.G.
REC-FSH-ID-02				
CÓDIGO PROYECTO	REVISION	FECHA	DESCRIPCION	POR