

# Recuperación del Aluminio de los Empaques Tipo Blíster por Medios Termomecánicos

Ávila John<sup>1</sup> ; Camacho Santiago<sup>2</sup> ; Galeas Salomé<sup>3,\*</sup> ; Huilca Luis<sup>4</sup> ; Proaño Patricia<sup>5</sup> ; Monar Willan<sup>6</sup> 

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador

**Resumen:** Se planteó un proceso de recuperación de aluminio por calentamiento de los empaques tipo blíster utilizados por la industria farmacéutica, los blísteres empleados para este estudio fueron los Push Through Blister (tipo 1). El proceso consistió en someterlos a temperaturas de 180°C durante 8 minutos y otros a 200°C durante 6 minutos y romper los enlaces que mantienen unidas las láminas de aluminio al polímero sin degradarlo. El porcentaje de láminas de aluminio recuperadas fue del 66,7%. El aluminio recuperado fue compactado antes de ser fundido, para el proceso de fusión se agregó fundente en una relación del 1% del peso total del material a fundir, y 0,25% de peso en desgasificante, el material se fundió a 750°C durante una hora obteniendo un rendimiento del 90%. El material se caracterizó mediante ensayos de dureza, metalográficos y de espectroscopía, y se obtuvo como resultado que el aluminio recuperado se asemeja a una aleación para fundición 1XX.X (Al > 99,0%). Adicionalmente, se realizaron ensayos DSC a cuatro muestras del polímero de los blísteres, con lo cual se determinó que una de las claves para el éxito del método planteado es que el polímero se comporte netamente como un material amorfo ante los incrementos de temperatura.

**Palabras clave:** Aluminio, empaques tipo blíster, PVC, reciclaje

## Recovery of Aluminum from Blister Packaging by Thermomechanical Means

**Abstract:** An aluminum recovery process was proposed by heating the blister packs used in the pharmaceutical industry, Push through Blister (type 1). The method consisted of using an electric muffle to break the bonds that hold the aluminum sheets and the polymer together without degrading it. The temperature and time used to process the materials were 180 °C for 8 minutes. Some samples were reprocessed at 200 °C for 6 minutes and then passed between the rollers of a duo type laminator to extract the aluminum foil. The average percentage of recovered aluminum foil was 66.7%. The recovered aluminum was compacted before melting. For the melting process, flux was added in a ratio of 1% of the total weight of the material to be melted, and 0.25% w/w degasser, the material was melted at 750 °C for one hour obtaining yield of 90%. The cast metal was subjected to hardness, metallographic and spectroscopy tests, determining that the recovered aluminum resembles a 1XX.X (Si) foundry alloy. Additionally, DSC tests were carried out on four samples of the blisters polymer, with these results it was evident that the major factor for the success of the proposed method is that the polymer behaves clearly as an amorphous material when temperature increases.

**Keywords:** Aluminum, blister packs, PVC, recycling

### 1. INTRODUCCIÓN

El empaque más empleado por la industria farmacéutica es el tipo blíster, estos empaques son desechados junto con la basura común a pesar de contener material que se puede recuperar, lo cual contribuye al creciente problema de contaminación ambiental por acumulación de desechos sólidos no degradables. En Ecuador, este tipo de desechos están

destinados a ser quemados o depositados en sistemas de relleno sanitario, lo cual implica que no se reutilice el material recuperable que en este caso es el aluminio (INEC, 2016).

#### 1.1 Empaques tipo blíster

En la industria farmacéutica, se utilizan los empaques tipo blíster como medio de embalaje para los medicamentos con forma de cápsulas, pastillas y tabletas. Los empaques deben

\* salome.galeas@epn.edu.ec  
Recibido: 04/12/2020  
Aceptado: 30/06/2022  
Publicado en línea: 02/02/2023  
10.33333/rp.vol51n1.06  
CC 4.0

conservar la integridad de los productos evitando que interactúen con el medio ambiente y sus factores de humedad o temperatura, por lo que las propiedades de barrera de los materiales que conforman el blíster son muy importantes al igual que su prolongado tiempo de vida útil (Alfipa, 2020).

Existen varios tipos de blíster para medicamentos, los principales son: (1) Push Through Blister, (2) Blíster laminado multicapa de aluminio con papel y/o PET, (3) Peel-Off-Push-Through, mostrados en la Figura 1. De éstos, el primero es el más empleado por la industria, los materiales poliméricos usados para su elaboración son: PE (polietileno), PVdC (cloruro de polivinilideno) y PVC (policloruro de vinilo), siendo este último el más común. (Yu et al., 2016). El aluminio es el otro material principal en los blísteres independientemente de su tipo, el amplio uso de ambos materiales se debe a su bajo costo, alta durabilidad y excelentes propiedades de barrera (Röchling, 2016; Pilchik, 2000).



Figura 1. Empaques tipo blíster más comunes para medicamentos (Alfipa, 2020)

### 1.2 Degradación de polímeros

Se considera degradación a cualquier alteración en las propiedades de un material debido a las condiciones de servicio o interacciones con su entorno. En este estudio, se utilizó la degradación térmica, la cual consiste en someter a los polímeros a temperaturas elevadas las cuales están entre 150°C y 200°C durante un tiempo, con esto se logra el ablandamiento de los polímeros (Posada, 2012; Serrano, 2010).

### 1.3 Tratamientos de recuperación de materiales asociados con el PVC

La recuperación de materiales metálicos que se encuentran adheridos o embebidos en PVC suele enfrentarse a la contaminación ambiental como una de sus principales problemáticas, ya que generalmente estos procesos involucran la incineración del material plástico para liberar el metálico, lo que genera altos niveles de contaminación y afectaciones a la salud, además de comprometer la integridad de los equipos de incineración debido a la naturaleza corrosiva de los gases emitidos. Por tal motivo se han desarrollado procesos que pretenden eliminar el impacto negativo de la incineración de PVC haciendo que esta no sea necesaria o tratando de beneficiarse de la misma. Un ejemplo es la pirólisis, que se enfoca en darle un uso final al polímero en lugar de recuperarlo, ya que durante la pirólisis el polímero es degradado hasta convertirlo en una fuente energética en forma de gas y coque (Aracil, 2008; Reuter, 2005; Rubinos, 2007).

#### 1.3.1 Vinyloop

El proceso denominado Vinyloop tiene como objetivo reciclar el PVC haciendo uso de una disolución y filtración selectiva, a la vez se recuperan de forma indirecta los materiales que lo contaminan, la calidad del PVC recuperado es prácticamente la misma del material original, ya que no pierde sus propiedades en forma significativa ni se ve contaminado

después de ser procesado. Una planta de procesamiento basada en Vinyloop resulta muy costosa, por lo que este proceso se aplica solamente cuando no se puede separar el PVC del agente contaminante por ningún otro método (Vandevyver & Thamm, 2012).

### 1.4 Aluminio

Es uno de los materiales más abundantes en el planeta tierra, pero no está libre en la naturaleza, siempre se encuentra combinado con otros minerales formando silicatos y óxidos, estas mezclas son denominadas bauxita, el proceso para obtener aluminio a partir de la bauxita es de elevado consumo energético e impacto ambiental negativo (Askeland, 1998). En el presente estudio al tratarse de recuperación de aluminio se estudiará el aluminio secundario y no el aluminio primario. (Li, 2008).

#### 1.4.1 Aluminio secundario

Comúnmente llamado aluminio reciclado, tiene varias ventajas sobre el aluminio primario, una de ellas es el ahorro energético, para producir una determinada cantidad de aluminio reciclado; se requiere solo el 5% de la energía necesaria para producir la misma cantidad de aluminio primario a partir de la bauxita (ARPAL, 2015; Frees, 2008; Millán et al., 2015).

### 1.5 Estado de la técnica

Actualmente se han desarrollado procesos de recuperación del aluminio de empaques tipo blíster, mediante la interacción de procesos químicos, usando la lixiviación de PVC con algunos solventes orgánicos y también implementando la fusión de las láminas de aluminio con sales de cloro y flúor. Otro método empleado es la fusión completa del PVC (Saeed, 2004), pero al realizar este proceso se genera una gran cantidad de contaminantes, debido a que es un proceso que requiere de agentes químicos; en este estudio se busca recuperar el aluminio sin la necesidad de utilizar químicos y utilizar procesos mecánicos y térmicos sin llegar a la fusión del PVC.

## 2. METODOLOGÍA

El proceso planteado para recuperar el aluminio consistió en dos etapas; clasificación, procesamiento, reprocesamiento de los blísteres y fusión del aluminio recuperado (ver Figura 2).

### 2.1 Clasificación de los empaques tipo blíster

El proceso de clasificación se realizó para garantizar que en la muestra a procesar solamente se encuentren blísteres del tipo Push Through Blister, en adelante mencionado como blíster tipo (1). La clasificación consistió en separar los blísteres tipo (1) de cualquier otro tipo de estos empaques, los cuales no fueron utilizados en este estudio debido a pruebas iniciales realizadas y por presentar una mala recuperación como se observa en la Figura 3a. Los blíster tipo (2) poseen varias capas de plástico y los tipo (3) presentan varias capas de papel. La presencia de dichas capas hizo prácticamente imposible la separación del aluminio, para lograr la separación de las capas de plástico y papel fue necesario incrementar la temperatura alrededor de 280°C, lo cual deterioró la delgada capa de aluminio al ser expuesta a contaminantes formados por la

degradación de los polímeros y resinas presentes en los blísters.

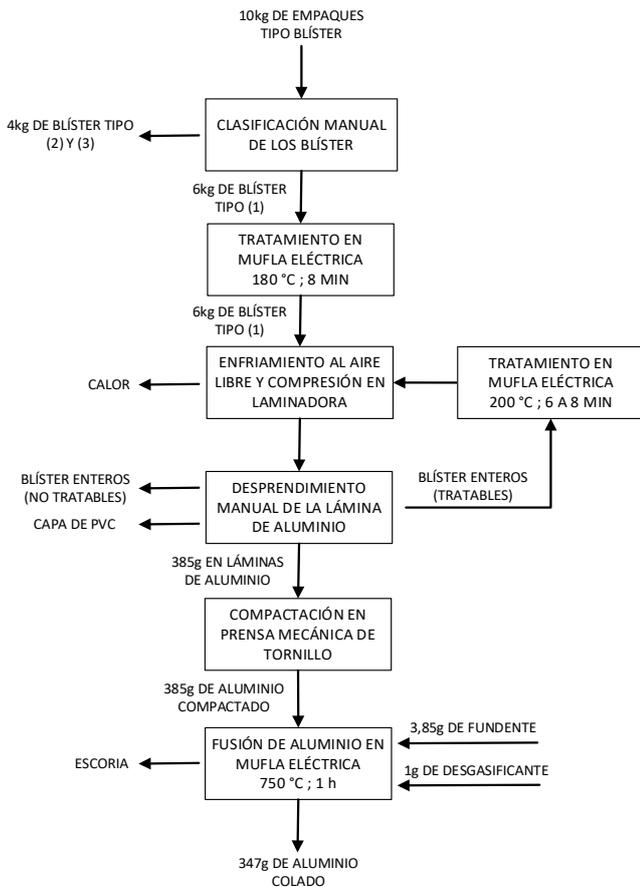


Figura 2. Diagrama del proceso de recuperación de aluminio de los empaques tipo blíster por medios térmicos y mecánicos

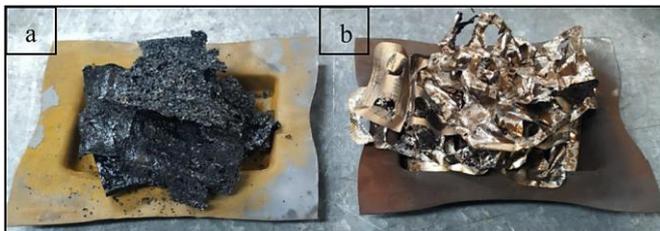


Figura 3. Pruebas iniciales realizadas para la recuperación del aluminio: a) Blíster tipo (2) y (3); b) Blíster tipo (1)

## 2.2 Procesamiento y reprocesamiento de los empaques tipo blíster

Tanto el procesamiento como el reprocesamiento se dividieron en 4 etapas: calentamiento, enfriamiento, compresión y desprendimiento de la lámina de aluminio. Estas etapas se ejecutaron en el orden mencionado, en algunos casos la compresión no fue necesaria para la separación de la lámina de aluminio del plástico.

En la fase de calentamiento, se introdujeron los blísters tipo (1) en una mufla eléctrica precalentada a 180°C, el volumen introducido fue tal que permitió colocar la mayor cantidad manteniéndolos correctamente espaciados entre sí durante un período de 8 minutos. En la fase de enfriamiento, las muestras tratadas se enfriaron hasta la temperatura ambiente en el aire; el desprendimiento de la lámina de aluminio fue manual y relativamente sencillo. Se obtuvo la lámina casi entera, sin

embargo, en algunos casos no fue posible este desprendimiento, por lo que requirió una fase de compresión que consistió en pasar las muestras tratadas entre los rodillos de un laminador dúo de laboratorio. Este proceso ayudó a romper ciertas capas adhesivas que se cristalizaron por efecto del calentamiento y enfriamiento previos, también sirvió para aplanar los relieves presentes en los blísters que contribuyen en la adherencia de la lámina metálica al polímero.

Las muestras en las que fue difícil obtener la lámina de aluminio fueron reprocesadas siguiendo los mismos pasos, incrementando la temperatura de la mufla a 200°C con un tiempo de calentamiento de 6 a 8 minutos. Después de los procesos descritos se compactaron las láminas de aluminio obtenidas utilizando una prensa mecánica de tornillo de 10 toneladas de capacidad.

## 2.3 Fundición del aluminio recuperado

La fundición se llevó a cabo en un crisol de acero siguiendo un proceso estándar para fundir aluminio reciclado. El proceso se realizó con una mufla eléctrica precalentada a 600°C con el crisol en su interior, se introdujo el aluminio junto con una carga de fundente equivalente al 0,5% y desgasificante al 0,125% del peso del material a fundir; se incrementó la temperatura de la mufla hasta 750°C durante una hora, finalmente se agregó una segunda carga de fundente y desgasificante en las mismas proporciones iniciales antes de colar el metal fundido.

## 2.4 Caracterización del material obtenido

Se realizaron ensayos de caracterización tanto al aluminio recuperado como a las muestras del PVC que forman parte del blíster. Para la caracterización del aluminio colado se realizaron ensayos de dureza, ensayos de espectroscopía por chispa y ensayos metalográficos para revelar su microestructura, mientras que para analizar el PVC se realizaron ensayos de calorimetría diferencial de barrido.

### 2.4.1 Ensayo de espectroscopía por chispa

Este ensayo se realizó bajo la norma ASTM E1251-17a (2017), las probetas (Figura 4) se maquinaron para cumplir las exigencias del equipo que se utilizó para el ensayo (espectrómetro BRUKER modelo Q4TASMAN). Estas exigencias son dimensionales para probetas de sección circular el diámetro y el espesor mínimos deben ser de 12mm y 3mm respectivamente, por lo que las probetas finales tuvieron un espesor de 4mm.



Figura 4. Probeta cilíndrica que se utilizó para los ensayos de espectroscopía por chispa y para obtener las metalografías

### 2.4.2 Ensayo metalográfico

La elaboración de las probetas de aluminio colado, requeridas para realizar los ensayos metalográficos, se basó en la norma ASTM E3-11 (2017), donde se establecen los procedimientos para la extracción, montaje, desbaste grueso, desbaste fino y

pulido de la muestra. Para este último paso se utilizó una suspensión de alúmina y luego otra de diamante de  $1\mu\text{m}$ . Posteriormente se realizó el ataque químico para revelar las microestructuras de la muestra, aplicando el reactivo KELLER y una mezcla de 1ml de ácido fluorhídrico en 200ml de agua destilada de acuerdo con la norma ASTM E407-07 (2015).

#### 2.4.3 Análisis por microscopía electrónica de barrido

El análisis de la muestra se realizó utilizando el microscopio electrónico de barrido Vega II LMU (Tescan), con analizador de rayos X Bruker, se utilizó 10.0 kV y D. imp. de 22.41 kcps.

#### 2.4.4 Ensayos de dureza

Estos ensayos se realizaron con base en la norma ASTM E18-20 (2020), con una carga de 60 kgf y el indentador de 1/8 in.

#### 2.4.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Los ensayos DSC se realizaron a las láminas poliméricas para complementar la interpretación de los resultados obtenidos al procesar y reprocesar las muestras durante el desprendimiento de las láminas de aluminio. El ensayo se realizó utilizando el calorímetro diferencial de barrido TA Instruments DSC Q2000 en un rango de temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$  a  $220^{\circ}\text{C}$ , empleando gas nitrógeno y una velocidad de calentamiento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Resultados de la aplicación del método de recuperación planteado

En la Tabla 1, además de los resultados obtenidos, se presentan los tratamientos aplicados a los blísteres para lograr separar la lámina de aluminio del PVC. En la columna Al, se indica el número de láminas de aluminio recuperadas de cada muestra, dichas muestras constaban de 20 unidades de empaques tipo blíster, y cada porcentaje de láminas obtenidas fue calculado promediando los resultados de tratar tres muestras, por ejemplo: de la muestra 1, se obtuvieron 12 láminas de Al (60%), de la muestra 2, se obtuvieron 15 láminas de Al (75%) y de la muestra 3, se obtuvieron 13 láminas de Al (65%); promediando las 3 muestras, el porcentaje de aluminio obtenido es del 66,7%, este valor corresponde a uno de los tratamientos durante 8 min.

El tratamiento considerado como más idóneo es el de  $180^{\circ}\text{C}$  durante 8 minutos, esto teniendo en cuenta el porcentaje de láminas de aluminio obtenidas y el grado de descomposición presentado por el PVC, si bien se pueden recuperar más láminas a mayor temperatura, la contaminación generada es mayor. Bajo las condiciones de tiempo y temperatura seleccionadas, existieron algunas marcas de blísteres en particular que presentaron resultados excepcionalmente buenos, ya que además de ser muy fácil desprender el aluminio de estos, también fueron los que resultaron menos degradados (Figura 5), debido a que necesitaron temperaturas un poco más bajas que los otros blísteres (de  $160^{\circ}\text{C}$  a  $180^{\circ}\text{C}$ ). Al trabajar a  $180^{\circ}\text{C}$  durante 10 min, se obtuvo buenos resultados para separar la lámina de aluminio del plástico, los blísteres presentaban un mayor grado de degradación y producían una mayor cantidad de gases por la permanencia en el horno.

**Tabla 1.** Porcentaje de láminas de aluminio obtenidas en función del tratamiento aplicado

| Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Tiempo [min] | Al [%] | Desviación Estándar ( $\sigma$ ) | Observación (Degradación del PVC) |
|------------------------------------|--------------|--------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 140                                | 5            | 0,32   | 0,27                             | Ninguna                           |
| 160                                |              | 16,67  | 1,33                             | Mínima                            |
| 180                                |              | 58,33  | 1,28                             | Baja                              |
| 200                                |              | 68,33  | 1,40                             | Media                             |
| 220                                |              | 86,67  | 1,85                             | Alta                              |
| 140                                | 8            | 0,68   | 0,38                             | Ninguna                           |
| 160                                |              | 25,03  | 1,18                             | Mínima                            |
| 180                                |              | 66,67  | 1,34                             | Baja                              |
| 200                                |              | 80,00  | 1,49                             | Media                             |
| 220                                |              | 91,67  | 1,71                             | Alta                              |
| 140                                | 10           | 0,73   | 0,47                             | Ninguna                           |
| 160                                |              | 26,68  | 1,12                             | Mínima                            |
| 180                                |              | 70,03  | 1,21                             | Baja                              |
| 200                                |              | 80,33  | 1,66                             | Media                             |
| 220                                |              | 90,04  | 1,81                             | Alta                              |



**Figura 5.** Blísteres que presentaron resultados excepcionalmente buenos, a la derecha se observa la lámina de aluminio separada del polímero después del procesamiento

#### 3.2 Resultados del proceso de fusión del aluminio obtenido

Antes de ser fundido, el aluminio fue compactado debido a que el rendimiento al fundir el papel de aluminio es muy bajo a causa de que el espesor del material es mínimo, dicho problema se soluciona con la compactación. Esto se evidencia con el rendimiento obtenido de la fundición, de una masa total de 385 g en láminas de aluminio, se recuperaron un total de 347 g de metal colado, lo que significa que el rendimiento fue del 90%. Los 385 g en láminas de aluminio que fueron fundidas se obtuvieron de aproximadamente 6 kg de blíster.

#### 3.3 Caracterización del aluminio recuperado

Los resultados de los ensayos realizados al aluminio recuperado fueron comparados con los resultados arrojados tras aplicar los mismos ensayos al aluminio colado que se obtuvo del papel de aluminio, esta comparativa se hizo por la similitud entre ambos, el papel de aluminio siempre se fabrica de determinadas aleaciones.

##### 3.3.1 Resultados de los ensayos de espectroscopía por chispa

El análisis se realizó con el espectrómetro de la marca BRUKER modelo Q4TASMAN. En la Tabla 2 se indican los resultados, en la cual MA presenta la muestra de aluminio recuperado de los blísteres, y MB la muestra del aluminio del papel de uso doméstico. Los resultados de este ensayo revelaron que en ambas muestras analizadas el elemento más abundante después del aluminio (Al), es el hierro (Fe), luego

de observar todos los demás elementos presentes en cada muestra y las proporciones de los mismos, se hace una comparación con el Metals Handbook de la ASM (ASM, 2004), evidenciándose que el aluminio extraído de los blísteres puede clasificarse como una aleación de la serie 1XX.X (Al > 99,0%), y se encontró que las muestras analizadas presentan variaciones respecto de los valores de los contenidos de impurezas de Silicio y Hierro.

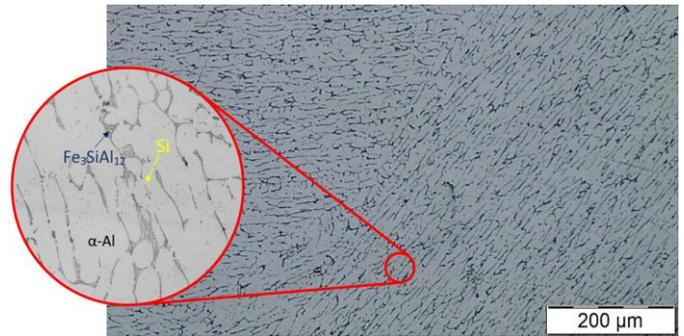
**Tabla 2.** Elementos presentes en las muestras ensayadas por espectroscopía por chispa (porcentajes en peso)

| Elemento  |      | MA        | MB        |
|-----------|------|-----------|-----------|
|           |      | Valor [%] | Valor [%] |
| Silicio   | [Si] | 0,193     | 0,643     |
| Hierro    | [Fe] | 0,974     | 0,768     |
| Cobre     | [Cu] | 0,009     | 0,018     |
| Manganeso | [Mn] | 0,010     | 0,022     |
| Cromo     | [Cr] | 0,003     | ND        |
| Níquel    | [Ni] | 0,003     | ND        |
| Zinc      | [Zn] | 0,011     | 0,093     |
| Titanio   | [Ti] | 0,020     | 0,013     |
| Galio     | [Ga] | 0,021     | 0,016     |
| Plomo     | [Pb] | 0,064     | 0,059     |
| Estaño    | [Sn] | 0,017     | ND        |
| Vanadio   | [V]  | 0,014     | 0,006     |
| Aluminio  | [Al] | 98,64     | 98,34     |

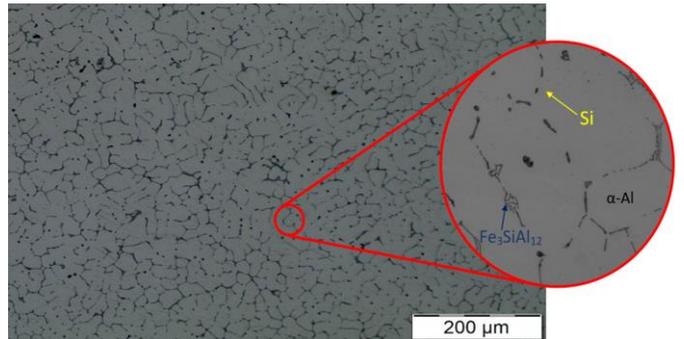
El material recuperado de los blísteres se puede clasificar como un aluminio puro que presenta un alto contenido de Fe, pues la cantidad de aluminio presente es muy cercana al 99%. Ambas muestras de aluminio tienen varios elementos en común, pero los porcentajes de estos siempre son diferentes en el aluminio obtenido de los blísteres, en la muestra recuperada de los blísteres existen elementos que no se encuentran en la otra muestra como el cromo (Cr) y el níquel (Ni), los cuales se suelen encontrar en el aluminio en cantidades muy bajas. Existen otros elementos como el galio (Ga), plomo (Pb), vanadio (V) y estaño (Sn) que pueden ser considerados contaminantes ya que además de no ser común su presencia en el aluminio (Al), son empleados en la producción de ciertos medicamentos, incluso se utiliza estroncio (Sr) en la elaboración de resinas y colorantes como las utilizadas en los mismos blísteres.

### 3.3.2 Ensayos metalográficos

Las microestructuras de las muestras A y B corresponden a una aleación de Al solidificada. El silicio se aprecia precipitado como partículas gruesas tipo placa y angulares. La fase secundaria de Si se representa como partículas de color negro (flecha), en la Figura 6 y Figura 7, se aprecia la distribución del microconstituyente intermetálico  $Fe_3SiAl_{12}$ , el cual se presenta con forma de escritura china de color gris, distribuida de manera no homogénea en la matriz de  $\alpha$ -Al.



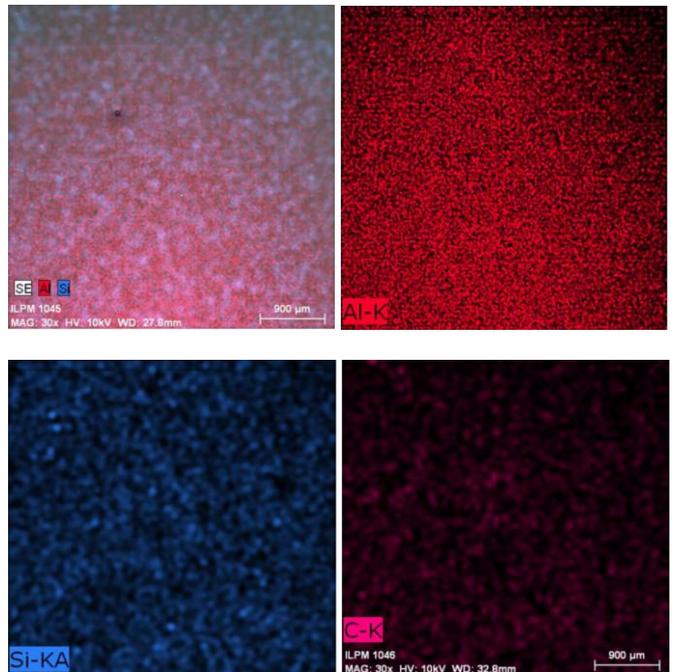
**Figura 6.** Metalografía a 500X de la muestra (A), aluminio obtenido de los blísteres



**Figura 7.** Metalografía a 500X de la muestra B, papel de aluminio de uso casero

### 3.3.3 Ensayos SEM-EDS

El análisis SEM realizado en la muestra A, presenta los resultados como se puede observar en la Figura 8, se identifica los materiales con mayor concentración con diferentes colores, aluminio (Al) color rojo, hierro (Fe) color rosado y silicio (Si) color azul.



**Figura 8.** SEM-EDS, Materiales presentes al realizar el ensayo SEM-EDS, se identificó por coloración

### 3.3.4 Ensayos de dureza

El objetivo de realizar los ensayos de dureza es cuantificar una de las propiedades mecánicas que permite evaluar la resistencia mecánica del material obtenido, se realizó 5 mediciones de dureza al aluminio obtenido de los blísters y al papel de aluminio, esto con el fin de poder comparar sus valores entre sí. El ensayo reveló que el papel de aluminio de uso doméstico es más duro que el recuperado de los blísters, las durezas obtenidas se muestran en la Tabla 3, la diferencia entre las durezas se debe al contenido de hierro de las muestras analizadas.

**Tabla 3.** Mediciones de durezas

| Muestra | Dureza [HR H] | Material                      |
|---------|---------------|-------------------------------|
| A       | 49,7          | Aluminio obtenido de Blísters |
| B       | 44,0          | Papel aluminio casero         |

### 3.4 Ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) aplicados al PVC

Para realizar estos ensayos, se empleó el calorímetro diferencial de barrido TA Instruments DSC Q2000, con una sensibilidad calorífica de  $0,2 \mu\text{W}$ , precisión calorimétrica de  $\pm 0,05 \%$  y apreciación de temperatura de  $\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ . En la Tabla 3, se numeran las muestras ensayadas y los tipos de resultados que estas entregaron durante el proceso, ya que fueron elegidas en función de cómo respondieron ante la aplicación del método planteado. En la Figura 9, se presentan las curvas calorimétricas obtenidas como resultado de ensayar las 4 muestras poliméricas de la Tabla 4, las cuales pertenecen a cuatro casas comerciales que distribuyen medicamentos en los hospitales públicos de Quito.

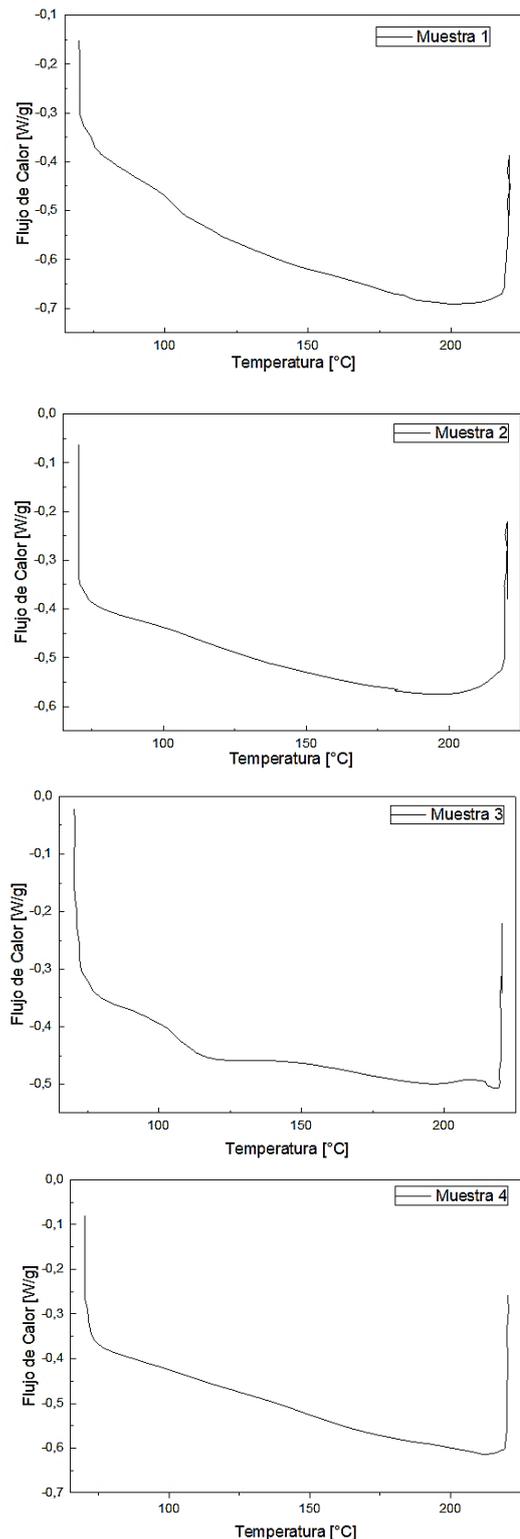
Las curvas DSC obtenidas revelan que el material base de las muestras es el PVC, ya que tienen en común la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) muy cercana a los  $70^\circ\text{C}$ , y la temperatura de degradación térmica ( $T_d$ ) cercana a  $220^\circ\text{C}$ .

**Tabla 4.** Muestras de polímero analizadas por la técnica DSC

| Muestra | Tipo de Polímero    | Observación   |
|---------|---------------------|---|
| 1       | Plástico traslúcido | Excelentes resultados durante el procesamiento.     |
| 2       | Plástico traslúcido | Excelentes resultados durante el procesamiento.     |
| 3       | Plástico traslúcido | Resultados regulares tras ser reprocesados.         |
| 4       | Plástico blanco     | Malos resultados con el plástico blanco en general. |

Las muestras 1, 2 y 4 presentan un comportamiento muy similar. Se observan características de un material amorfo, ya que en las curvas no se aprecia un pico que indique que el polímero se fundió en algún momento. Se debe tener en cuenta que solo los polímeros cristalinos y semicristalinos pasan por un proceso de fusión antes de llegar a la degradación.

La curva de la muestra 3 presenta dos picos, de estos el que se encuentra alrededor de  $120^\circ\text{C}$ , indica que el material pasó brevemente al estado líquido (inicio de fusión), dicho comportamiento significa que en la muestra 3, la porción semicristalina del material es mayor que en las otras muestras, pues el PVC es un polímero principalmente amorfo que no suele superar el 20% de cristalinidad (Balart, 2011).



**Figura 9.** Curvas calorimétricas DSC de los polímeros de los blísters tipo 1

## 4. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada entregó excelentes resultados para la recuperación de aluminio de los blísters tipo Push Through Blister. La obtención del aluminio resultó más factible para estos blísters que al presentar menor porción semicristalina en la composición del polímero, no se fundieron frente a los incrementos de temperatura. Por otra parte, con los otros dos tipos de blísters mostrados en la Figura 3, no se

pudo obtener resultados que justifiquen la aplicación de esta metodología debido a que las muestras se fundían o se requería realizarse un reproceso una y otra vez volviendo más lenta la recuperación de aluminio.

El rendimiento obtenido del proceso seguido para la separación de la lámina de aluminio del PVC resultó ser relativamente alto, ya que en promedio tiene un valor de 66%, lo que pudo llegar a ser aún mayor, además en las muestras que menor rendimiento se obtuvo, no fue inferior al 50%.

El aluminio que se recuperó en base al análisis químico realizado pertenece a la serie 1XX.X (Al > 99,0%), la dureza obtenida está dentro de lo esperado para este material, al presentar una dureza similar a la dureza del papel de aluminio de uso doméstico.

Se demuestra la importancia de la acción mecánica de compactación previa del aluminio recuperado para que el rendimiento de la fundición sea elevado (90%), mientras que sin la compactación y debido al bajo espesor de las láminas de aluminio más las resinas poliméricas presentes en ellas, el material en su mayoría se oxida volviéndose una especie de escoria.

#### AGRADECIMIENTO

A los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, especialmente al laboratorio de Nuevos Materiales, Fundición, Conformado Mecánico, Ensayos no Destructivos, Metalografía Desgaste y Falla y al Departamento de Metalurgia Extractiva.

#### REFERENCIAS

- Alfipa. (2020). *Aluminio & Láminas Blister en la Industria Farmaceutica*.  
<https://alfipa.es/aplicaciones/aluminio-industria-farmaceutica/>
- Aracil, I. (2008). Formación de contaminantes y estudio cinético de la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP) [tesis de doctorado, Universidad de Alicante].  
<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/>
- ARPAL. (2015). *Reciclado de aluminio Formación de formadores*. [www.aluminio.org/](http://www.aluminio.org/)
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales* (3a ed.). CENGAGE Learning.
- ASM. (2004). *Metallography and Microstructures Handbook*. (Vol.9). *ASM International*.
- ASTM E1251-17a. (2017). Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry. *Annual Book of ASTM Standards*, i, 1–10.  
<https://doi.org/10.1520/E1251-17A>
- ASTM E3-11. (2017). Preparation of Metallographic Specimens. *Annual Book of ASTM Standards*, 11(Reapproved 2017), 1–12.  
<https://doi.org/10.1520/E0003-11R17>
- ASTM E18-20. (2020). Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. *Annual Book of ASTM Standards*, 1–38.  
<https://doi.org/10.1520/E0018-14>
- ASTM E407-07. (2015). Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. *Annual Book of ASTM Standards*, 07(Reapproved 2015), 1–22.  
<https://doi.org/10.1520/E0407-07R15E01>
- Balart, R. (21 de septiembre de 2011). *Interpretación de curvas calorimétricas (DSC)*. Universidad politécnica de Valencia, MOOC Ingeniería de materiales.  
<https://upvx.es/#/portal/video/4edff5b0-340f-0442-b966-07a578a9f877>
- Frees, N. (2008). Crediting aluminium recycling in LCA by demand or by disposal. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(3), 212–218.  
<https://doi.org/10.1065/lca2007.06.348>
- INEC. (20 de marzo de 2016). Información ambiental en hogares. Recuperado el 05 septiembre de 2020 de:  
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/inec/EncuestasAmbientales2016.com>
- Li, Y. (2008). *Analytical Study and Cost Modeling of Secondary Aluminum Consumption for Alloy Producers under Uncertain Demands*. [Tesis de Maestría, Instituto de Tecnología de Massachusetts].  
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/44422>
- Millán, F., Pilar, D., Jairo, J., & Fl, O. (2015). Reciclaje de aluminio oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 18(2), 135–152.  
<https://www.redalyc.org/pdf/1694/169443282008.pdf>
- Pilchik, R. (2000). Pharmaceutical blister packaging, Part I: Rationale and materials. *Pharmaceutical Technology*, 24(11), 68–78.
- Posada, B. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad Eafit*. 94(1), 67-86.  
<https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revis-ta-universidad-eafit/article/view/1408/1280>
- Reuter, M., Heiskanen, K., Boin, U., Van Schaik, A., Verhoef, E., Yang, Y., & Georgalli, G. (2005). Aluminium metal production. *The Metrics of Material and Metal Ecology*. 16, 391–451.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)80027-4](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)80027-4)
- Röchling. (2016). *Plásticos de alto rendimiento para la construcción de depósitos e instalaciones químicas*.

<https://www.roechling.com/es/industrial/construccion-de-contenedores-quimico>

- Rubinos, D. (2007). *Utilización de Lodos Rojos De Bauxita en la Contención e Inactivación de Residuos Tóxicos y Peligrosos*. [Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela.
- Saeed, L. (2004). *Experimental assessment of two-stage combustion of high PVC solid waste with HCL recovery*. [Dissertation for the degree of Doctor of Science, Helsinki University of Technology, Finland].
- Serrano, J. (2010). *Evaluación del envase de polivinilcloruro (PVC) en ampolla para uso oral, mediante la estabilidad química de soluciones patrón a base de vitaminas del complejo "B."* [Tesis de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala].  
[http://www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06\\_2993.pdf](http://www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_2993.pdf)
- Vandevyver, E., & Thamm, C. (2012). Benchmarking of the environmental impact of PVC compound recycled in the VinyLoop process with PVC compound produced in conventional route (virgin PVC compound and incineration). *VinyLoop*, [https://plasticker.de/news/docs/Executive\\_Summary\\_Vinyloop\\_Eco-Footprint\\_Study.pdf](https://plasticker.de/news/docs/Executive_Summary_Vinyloop_Eco-Footprint_Study.pdf)
- Yu, J., Sun, L., Ma, C., Qiao, Y., & Yao, H. (2016). Thermal degradation of PVC: A review. *Waste Management*, 48, 300-314.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.041>

## BIOGRAFÍAS



**John Douglas Ávila Sinchire**, Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional graduado con el proyecto de investigación titulado “Diseño de un proceso de recuperación de aluminio por fusión de los empaques tipo blíster”. Actualmente trabajo en VYMSA procesadora de acero como Líder de producción de la línea de

Arquitectura en vidrio INOX GLASS en donde además se encarga del diseño y desarrollo de nuevos productos, certificado como Auditor interno en sistemas de gestión de la calidad ISO 9001 y Diseño mecánico profesional CSWP



**Luis Gustavo Huilca Caisalitin**, Ingeniero Mecánico graduado en la Escuela Politécnica Nacional, trabajo actualmente en el Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica, me desempeño como Técnico de Investigación en las áreas de Procesos de Manufactura y Materiales Compuestos, así como el Modelado y Simulación de Procesos Metalúrgicos, he participado en proyectos de investigación tales como uso del método DIC (Digital Image Correlation) en polímeros, y poseo la Maestría Investigativa en Metalurgia por la Facultad de Ingeniería Química, realizando el proyecto de publicación titulado “Review of the characteristics of microstructural gradients in functionally graduated aluminum metallic compounds and their formation mechanism”.



**Santiago Brian Camacho Morales**, Ingeniero Mecánico graduado en la EPN y actual estudiante de la Maestría en Materiales de la misma, trabajo como Técnico del Laboratorio de Conformado Mecánico y del laboratorio de Ensayos No Destructivos, he participado como colaborador en proyectos de investigación de materiales

específicamente en el área de soldadura y calidad, también en el diseño y construcción aditiva de motores Brushless para prototipo de vehículos eléctricos, áreas de interés: materiales compuestos, procesos de conformabilidad de materiales por deformación plástica, diseño de vehículos eléctricos, ensayos no destructivos, estudio de biopolímeros para aplicaciones mecánicas.



**Patricia Proaño-Sánchez**, Ingeniera Mecánica (2012), con título de Maestría en Sistemas Automotrices de la Escuela Politécnica Nacional (2019), se ha desempeñado como Instructora de Física en el Departamento de Formación Básica de la EPN (2010), en la actualidad, se desempeña como especialista de caracterización de materiales y análisis de falla en el Departamento de Materiales, sus actividades de investigación están ligadas a las áreas fundición, soldadura, corrosión y análisis de falla, participa de manera activa en auditorías como experto técnico del SAE, a su haber cuenta con publicaciones científicas y la publicación en curso de un libro, se encuentra inscrita como Investigadora en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación.



**Salomé Gabriela Galeas Hurtado**, Ingeniera Química graduada en la Escuela Politécnica Nacional (EPN), 2008. Especialista de Caracterización de Materiales en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN desde Marzo de 2010.

Experiencia en la síntesis y caracterización de nanopartículas, nanocompuestos y compuestos lignocelulósicos. Experiencia en la operación de equipos especializados para: extrusión, inyección, microscopía electrónica de barrido (SEM), caracterización de partículas mediante luz láser, espectroscopía FT-IR, análisis termomecánico (TGA, DSC, TMA), entre otros. Participación en proyectos de investigación relacionados al desarrollo de nuevos materiales que incluyen compuestos de matriz polimérica y materiales nanoestructurados con propiedades multifuncionales.



**Willan Leopoldo Monar M. Msc**: Diseño Producción y Automatización, MBA Gerencia Empresarial Gestión de Proyectos, Diplomado Gestión de Proyectos, BID, Ing. Mecánico, EPN, Subdecano Facultad Ing. Mecánica EPN, línea de investigación: Desarrollo, Caracterización y Procesamiento de Materiales Sólidos, áreas de interés: selección de materiales, materiales compuestos, máquinas, procesos de transformación de materiales metálicos por deformación plástica, propiedades mecánicas de materiales compuestos metálicos con refuerzos cerámicos, equipo mecánico, equipo neumático, energías alternativas, control mediante redes neuronales, gestión de la calidad, procesos de producción, mantenimiento y seguridad industrial.

