

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**DISEÑO DE UNA PLANTA PARA RECUPERACIÓN DE ALUMINIO DE
ENVASES MULTICAPA MEDIANTE LIXIVIACIÓN CON SOLVENTES
ORGÁNICOS Y FUNDICIÓN**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

FRANCISCO XAVIER ESTRELLA SANDOVAL
(francisco.essan@gmail.com)

DIRECTOR: ING. ERNESTO DE LA TORRE
(ernesto.delatorre@epn.edu.ec)

Quito, mayo 2013

© Escuela Politécnica Nacional (2013)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Francisco Xavier Estrella Sandoval, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Francisco Xavier Estrella Sandoval

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Francisco Xavier Estrella Sandoval, bajo mi supervisión.

Ernesto de la Torre Ch.
DIRECTOR DE PROYECTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | i |
| INTRODUCCIÓN | ii |
| 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 1 |
| 1.1. ENVASES MULTICAPA CON LÁMINA DE ALUMINIO | 1 |
| 1.1.1. CARACTERÍSTICAS DE ENVASES MULTICAPA ASÉPTICOS | 2 |
| 1.1.2. COMPONENTES DE LOS ENVASES MULTICAPA ASÉPTICOS | 2 |
| 1.2. MÉTODOS DE RECICLAJE DE ENVASES MULTICAPA | 5 |
| 1.2.1. RECICLAJE SIN SEPARACIÓN DE CAPAS | 6 |
| 1.2.2. RECICLAJE DE PULPA DE PAPEL | 8 |
| 1.2.3. RECICLAJE DE LÁMINA DE POLIETILENO/ALUMINIO | 11 |
| 1.2.3.1. Material compuesto polietileno/aluminio | 11 |
| 1.2.3.2. Pirólisis de láminas polietileno/aluminio | 12 |
| 1.2.3.3. Tecnología de separación por plasma | 15 |
| 1.3. LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO CON SOLVENTES | 16 |
| 1.3.1. POLIMEROS | 17 |
| 1.3.2. POLIETILENO | 19 |
| 1.3.2.1. Clasificación de polietileno | 19 |
| 1.3.2.2. Propiedades del polietileno | 19 |
| 1.3.3. SOLUBILIDAD DE POLIETILENO | 20 |
| 1.3.4. SOLVENTES | 23 |
| 1.3.4.1. Xileno | 23 |
| 1.3.4.2. Tricloro benceno | 23 |
| 1.4. PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO | 24 |
| 1.4.1. ALUMINIO SECUNDARIO | 25 |
| 1.4.2. PROBLEMAS EN LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO | 25 |
| 1.4.2.1. Fundición de chatarra | 27 |
| 1.4.2.2. Fundición de escoria | 28 |
| 1.4.3. FUNDICIÓN CON SALES FUNDENTES | 28 |
| 1.4.4. MEZCLAS DE SALES FUNDENTES | 30 |
| 1.4.4.1. Diagramas de fase de mezclas de sales fundentes | 31 |
| 1.4.4.2. Tensión interfacial entre aluminio y sales fundentes | 33 |
| 1.4.4.3. Coalescencia del aluminio en sales fundentes | 34 |
| 1.4.4.4. Interacción entre el óxido y las sales fundentes | 35 |
| 1.4.4.5. Fundición de escoria y chatarra de aluminio en presencia de sales fundentes | 35 |
| 2. PARTE EXPERIMENTAL | 39 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.1. | ENSAYOS DE SEPARACIÓN DE LA LÁMINA DE CARTÓN Y LA PRIMERA LÁMINA DE POLIETILENO MEDIANTE AGITACIÓN CON AGUA. | 41 |
| 2.1.1. | DESAGREGACIÓN DE ENVASES MULTICAPA | 42 |
| 2.1.2. | SECADO DE LÁMINAS DE ALUMINIO/POLIETILENO | 43 |
| 2.2. | ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO CON XILENO, TRICLORO BENCENO PUROS Y EN SOLUCIÓN CON ETANOL 50 % | 44 |
| 2.2.1. | ANÁLISIS QUÍMICO DE LÁMINAS DE ALUMINIO | 47 |
| 2.2.2. | RECUPERACIÓN DE SOLVENTE | 48 |
| 2.3. | ENSAYOS DE FUNDICIÓN DE LAS LÁMINAS DE ALUMINIO CON CLORURO DE SODIO, CLORURO DE POTASIO Y FLUORURO DE POTASIO. | 48 |
| 2.3.1. | ENSAYOS DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA | 50 |
| 2.3.2. | ENSAYOS DE VARIACIÓN DEL TIEMPO DE FUSIÓN | 51 |
| 2.3.3. | ENSAYOS DE VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE CARGA FUNDENTE | 52 |
| 2.3.4. | ENSAYOS DE ADICIÓN DE FLUORURO DE POTASIO (KF) | 52 |
| 2.3.5. | ENSAYOS DE FUNDICIÓN DE LÁMINAS DE ALUMINIO/POLIETILENO | 53 |
| 2.4. | CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DEL ALUMINIO OBTENIDO PARA DETERMINAR SUS APLICACIONES COMERCIALES. | 53 |
| 2.4.1. | ANÁLISIS QUÍMICO DEL ALUMINIO | 54 |
| 2.4.2. | ANÁLISIS MINERALÓGICO DEL ALUMINIO | 54 |
| 2.5. | DETERMINACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS. | 54 |
| 2.5.1. | DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE ENVASES MULTICAPA | 55 |
| 2.5.2. | DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS | 55 |
| 2.5.2.1. | Tanque desagregador | 56 |
| 2.5.2.2. | Tanque de lixiviación | 56 |
| 2.5.2.3. | Horno eléctrico | 56 |
| 2.5.2.4. | Tamiz de pantalla | 57 |
| 2.5.2.5. | Equipo de destilación | 57 |
| 2.6. | ESTUDIO DE PRE FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA CON CAPACIDAD DE 200 t DE ENVASES MULTICAPA POR MES. | 57 |
| 3. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 59 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3.1. | ENSAYOS DE SEPARACIÓN DE LA LÁMINA DE CARTÓN Y LA PRIMERA LÁMINA DE POLIETILENO MEDIANTE AGITACIÓN CON AGUA. | 59 |
| 3.2. | ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO CON XILENO, TRICLORO BENCENO PUROS Y EN SOLUCIÓN CON ETANOL 50 % | 67 |
| 3.2.1. | ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO CON SOLVENTES | 67 |
| 3.2.1.1. | Ensayos de lixiviación de polietileno con xileno puro | 68 |
| 3.2.1.2. | Ensayos de lixiviación de polietileno con xileno con etanol 50 % | 69 |
| 3.2.1.3. | Ensayos de lixiviación de polietileno con tricloro benceno puro | 70 |
| 3.2.1.4. | Ensayos de lixiviación de polietileno con tricloro benceno con etanol 50 % | 71 |
| 3.2.1.5. | Láminas de aluminio luego de la lixiviación de polietileno | 73 |
| 3.2.2. | ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS LÁMINAS DE ALUMINIO | 76 |
| 3.2.3. | RECUPERACIÓN DE SOLVENTE | 77 |
| 3.3. | ENSAYOS DE FUNDICIÓN DE LAS LÁMINAS DE ALUMINIO CON CLORURO DE SODIO, CLORURO DE POTASIO Y FLUORURO DE POTASIO. | 77 |
| 3.3.1. | ENSAYOS DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA | 78 |
| 3.3.2. | ENSAYOS DE VARIACIÓN DEL TIEMPO DE FUSIÓN | 81 |
| 3.3.3. | ENSAYOS DE VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE CARGA FUNDENTE | 83 |
| 3.3.4. | ENSAYOS DE ADICIÓN DE FLUORURO DE POTASIO (KF) | 85 |
| 3.3.5. | ENSAYOS DE FUNDICIÓN DE LÁMINAS DE ALUMINIO/POLIETILENO | 87 |
| 3.4. | CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DEL ALUMINIO OBTENIDO PARA DETERMINAR SUS APLICACIONES COMERCIALES. | 89 |
| 3.4.1. | CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL ALUMINIO | 89 |
| 3.4.1.1. | Caracterización química del aluminio mediante espectrofotometría de chispa | 90 |
| 3.4.1.2. | Caracterización química del aluminio mediante analizador de rayos X de microscopio electrónico | 92 |
| 3.4.2. | CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL ALUMINIO | 94 |
| 3.5. | DETERMINACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS. | 95 |
| 3.5.1. | DETERMINACIÓN DE DIAGRAMA DE FLUJO | 97 |
| 3.5.1.1. | Diagrama de flujo del proceso con etapa de lixiviación | 97 |
| 3.5.1.2. | Diagrama de flujo del proceso sin la etapa de lixiviación. | 100 |
| 3.5.2. | DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS | 102 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.5.2.1. | Dimensionamiento de tanque desagregador | 103 |
| 3.5.2.2. | Dimensionamiento de tanque de lixiviación | 105 |
| 3.5.2.3. | Dimensionamiento de horno eléctrico | 106 |
| 3.5.2.4. | Dimensionamiento de tamiz | 107 |
| 3.5.2.5. | Dimensionamiento de equipo de destilación. | 108 |
| 3.5.2.6. | Distribución de equipos en planta. | 108 |
| 3.6. | ESTUDIO DE PRE FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA CON CAPACIDAD DE 200 t DE ENVASES MULTICAPA POR MES. | 113 |
| 3.6.1. | COSTO DE TERRENO E INFRAESTRUCTURA | 113 |
| 3.6.2. | COSTO DE EQUIPOS PRINCIPALES | 114 |
| 3.6.3. | COSTOS FIJOS | 115 |
| 3.6.3.1. | Salarios del personal | 115 |
| 3.6.3.2. | Mantenimiento de equipos | 116 |
| 3.6.4. | COSTOS VARIABLES | 117 |
| 3.6.4.1. | Materia prima | 117 |
| 3.6.4.2. | Consumo de reactivos | 117 |
| 3.6.4.3. | Consumo de energía eléctrica | 118 |
| 3.6.4.4. | Consumo de Agua | 120 |
| 3.6.5. | INGRESOS | 120 |
| 3.6.6. | INDICADORES ECONÓMICOS | 121 |
| 3.6.7. | ELECCIÓN DEL TIPO DE PLANTA DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO | 125 |
| 4. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 128 |
| 4.1. | CONCLUSIONES | 128 |
| 4.2. | RECOMENDACIONES | 130 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 131 |
| | ANEXOS | 137 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabla 1.1 | Comparación de las propiedades entre polietileno de baja densidad y el material compuesto de polietileno y aluminio. | 12 |
| Tabla 1.2 | Condiciones de trabajo para ensayos de pirólisis y productos obtenidos | 14 |
| Tabla 1.3 | Condiciones de fundición de láminas metálicas obtenidas en pirólisis ($\lambda=0,78$) y porcentaje de fase metálica | 14 |
| Tabla 1.4 | Composición de las muestras del resultado de la fundición de láminas metálicas obtenidas por pirólisis de envases multicapa | 15 |
| Tabla 1.5 | Análisis químico de aluminio obtenido por plasma térmico | 16 |
| Tabla 1.6 | Clasificación de polietileno por densidad | 19 |
| Tabla 1.7 | Temperatura de transición vítrea y fusión de polietileno | 20 |
| Tabla 1.8 | Resumen de solubilidad de algunos polímeros | 22 |
| Tabla 1.9 | Propiedades físicas del aluminio y óxido de aluminio | 24 |
| Tabla 1.10 | Fuentes de chatarra de aluminio y sus impurezas | 27 |
| Tabla 1.11 | Condiciones de operación definidas para la fundición de desechos industriales y electrónicos de aluminio en presencia de sales fundentes | 36 |
| Tabla 1.12 | Recuperación de aluminio con la variación de la composición de la mezcla de sales fundentes para la fundición de limallas de corte de perfiles de aluminio | 36 |
| Tabla 1.13 | Recuperación de aluminio con la variación del porcentaje de sales fundentes para la fundición de limallas de corte de perfiles de aluminio. | 37 |
| Tabla 1.14 | Recuperación de aluminio con la variación de tiempo de fundición para limallas de corte de perfiles de aluminio | 37 |
| Tabla 1.15 | Análisis de la influencia de la agitación en el tiempo de fundición de limallas corte de perfiles de aluminio a 850°C | 38 |
| Tabla 2.1 | Parámetros para la adición de fluoruro de potasio | 53 |
| Tabla 2.2 | Parámetros para fundición de láminas de aluminio/polietileno | 53 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| Tabla 3.1 | Recuperación de láminas de polietileno/aluminio con 2 hp de agitación, 100 L de agua y carga de 10 envases multicapa (280 g) | 60 |
| Tabla 3.2 | Recuperación de láminas de polietileno/aluminio con 2 hp de agitación, 100 L de agua y carga de 20 envases multicapa (560 g) | 60 |
| Tabla 3.3 | Recuperación de láminas de polietileno/aluminio con 2 hp de agitación, 100 L de agua y carga de 30 envases multicapa (840 g) | 61 |
| Tabla 3.4 | Recuperación de láminas de polietileno/aluminio con 2 hp de agitación, 100 L de agua y carga de 40 envases multicapa (1120 g) | 63 |
| Tabla 3.5 | Pérdida de masa de láminas de polietileno/aluminio luego de lixiviación con xileno puro | 68 |
| Tabla 3.6 | Pérdida de masa de láminas de polietileno/aluminio luego de lixiviación con mezcla de xileno y etanol 50 % | 69 |
| Tabla 3.7 | Pérdida de masa de láminas de polietileno/aluminio luego de lixiviación con tricloro benceno puro | 70 |
| Tabla 3.8 | Pérdida de masa de láminas de polietileno/aluminio luego de lixiviación con mezcla de tricloro benceno y etanol 50 % | 71 |
| Tabla 3.9 | Análisis químico de las láminas metálicas obtenidas de la lixiviación de polietileno con solventes | 76 |
| Tabla 3.10 | Resultados de la variación de temperatura de fundición | 79 |
| Tabla 3.11 | Resultados de la variación del tiempo de fusión a 750°C | 81 |
| Tabla 3.12 | Resultados de la variación de cantidad de carga fundente para la fundición de aluminio a 750°C durante 30 minutos | 83 |
| Tabla 3.13 | Resultados de la adición de fluoruro de potasio (KF) en la fundición de aluminio a 750°C, 30 minutos con 200 % de carga fundente | 85 |
| Tabla 3.14 | Resultados de la fundición de láminas de polietileno/aluminio a 750°C, 30 minutos con 200 % de carga fundente con respecto a aluminio a fundirse | 88 |
| Tabla 3.15 | Análisis químico mediante espectrofotometría de chispa del producto metálico de la fundición de láminas de aluminio provenientes de envases multicapa post consumo. | 90 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Tabla 3.16 | Composición de la región de aluminio fundido, analizada a 200 aumentos | 93 |
| Tabla 3.17 | Composición de la región de aluminio fundido, analizada a 3000x | 94 |
| Tabla 3.18 | Tiempo de operación en cada proceso | 96 |
| Tabla 3.19 | Dimensionamiento del tanque desagregador | 104 |
| Tabla 3.20 | Características del tanque desagregador | 105 |
| Tabla 3.21 | Dimensionamiento de tanque de lixiviación | 106 |
| Tabla 3.22 | Características de tanques de lixiviación | 106 |
| Tabla 3.23 | Características del horno eléctrico | 107 |
| Tabla 3.24 | Características de tamiz | 107 |
| Tabla 3.25 | Características del equipo de destilación para recuperación de solvente | 108 |
| Tabla 3.26 | Costos de terreno e infraestructura | 114 |
| Tabla 3.27 | Costo de equipos principales para el proceso, incluido la etapa de lixiviación | 114 |
| Tabla 3.28 | Costo de equipos principales para el proceso, sin la etapa de lixiviación | 115 |
| Tabla 3.29 | Salarios del personal | 116 |
| Tabla 3.30 | Costo de mantenimiento de equipos de la planta de recuperación de aluminio con lixiviación de polietileno de envases multicapa | 116 |
| Tabla 3.31 | Costo de mantenimiento de equipos de la planta de recuperación de aluminio con lixiviación de polietileno de envases multicapa | 116 |
| Tabla 3.32 | Consumo de reactivos para las etapas de lixiviación y fundición | 118 |
| Tabla 3.33 | Consumo de reactivos para las etapas de fundición | 118 |
| Tabla 3.34 | Consumo de energía de los principales equipos de la planta incluido los equipos para la etapa de lixiviación | 119 |
| Tabla 3.35 | Consumo de energía de los principales equipos de la planta sin equipos de la etapa de lixiviación | 119 |

| | | |
|----------------------|---|-----|
| Tabla 3.36 | Ingresos de la planta que utiliza etapa de lixiviación | 120 |
| Tabla 3.37 | Ingresos de la planta que no utiliza etapa de lixiviación | 121 |
| Tabla 3.38 | Egresos anuales de la planta con etapa de lixiviación | 122 |
| Tabla 3.39. | Ingresos anuales de la planta con etapa de lixiviación | 122 |
| Tabla 3.40 | Flujo de caja de la planta con etapa de lixiviación | 123 |
| Tabla 3.41 | Indicadores económicos de la planta con etapa de lixiviación | 123 |
| Tabla 3.42 | Egresos anuales de la planta sin etapa de lixiviación | 124 |
| Tabla 3.43 | Ingresos anuales de la planta sin etapa de lixiviación | 124 |
| Tabla 3.44 | Flujo de caja de la planta sin etapa de lixiviación | 124 |
| Tabla 3.45 | Indicadores económicos de la planta sin etapa de lixiviación | 125 |
| Tabla 3.46 | Resumen de balance de masa de las plantas con lixiviación y sin lixiviación para 10 000 kg de envases multicapa por día | 126 |
| Tabla 3.47 | Resumen de balance de energía de las plantas con lixiviación y sin lixiviación para un día de operación | 126 |
| Tabla 3.48 | Cuadro comparativo de indicadores económicos para la planta de recuperación de aluminio a partir de envases multicapa, con etapa de lixiviación y sin lixiviación | 127 |
| Tabla A.III.1 | Características de catálogo de tanque desagregador | 148 |
| Tabla A.III.2 | Características de catálogo de tanque de lixiviación | 149 |
| Tabla A.III.3 | Características de catálogo de horno eléctrico | 150 |
| Tabla A.III.4 | Características de catálogo de tamiz vibratorio | 151 |
| Tabla A.III.5 | Características de catálogo de equipo de destilación | 152 |
| Tabla A.IV.1 | Resultados de la desagregación de 10 envases multicapa en 100 L de agua | 153 |
| Tabla A.IV.2 | Resultados de la desagregación de 20 envases multicapa en 100 L de agua | 154 |

| | |
|--|-----|
| Tabla A.IV.3 Resultados de la desagregación de 30 envases multicapa en 100 L de agua | 155 |
| Tabla A.IV.4 Resultados de la desagregación de 40 envases multicapa en 100 L de agua | 156 |
| Tabla A.VI.1 Composición de carga fundente para ensayos de fundición | 167 |
| Tabla A.VI.2 Composición de carga fundente para ensayos de fundición con adición de 5 % de KF | 173 |
| Tabla A.VI.3 Composición de carga fundente para ensayos de fundición con la adición de 10 % de KF | 173 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 1.1 | Capas de un envase multicapa aséptico | 5 |
| Figura 1.2 | Proceso de fabricación de tableros aglomerados | 8 |
| Figura 1.3 | Esquema de un desagregador | 9 |
| Figura 1.4. | Antorcha de plasma | 15 |
| Figura 1.5 | Efecto de la temperatura en la estructura y comportamiento de los polímeros termoplásticos | 18 |
| Figura 1.6 | Modelo de solubilidad de polietileno en xileno | 22 |
| Figura 1.7 | Mecanismo de destrucción de la capa superficial de óxido | 30 |
| Figura 1.8 | Diagrama de fase del sistema NaCl-KCl | 32 |
| Figura 1.9 | Diagrama de fase para el sistema NaCl-KCl-NaF | 33 |
| Figura 1.10 | Influencia de la adición de fluoruro de sodio en la fundición de residuos industriales y electrónicos | 38 |
| Figura 2.1 | Esquema de la metodología experimental | 40 |
| Figura 2.2 | Envases multicapa previamente lavados | 41 |
| Figura 2.3 | Tanque para agitación | 42 |
| Figura 2.4 | Agitación de envases multicapa | 43 |
| Figura 2.5 | Secado de láminas de aluminio/polietileno | 44 |
| Figura 2.6 | a) Equipo de extracción soxhlet, b) Esquema del equipo | 45 |
| Figura 2.7 | Láminas de polietileno/aluminio dentro del cartucho de celulosa | 46 |
| Figura 2.8 | Equipo de extracción soxhlet armado | 47 |
| Figura 2.9 | Mufla eléctrica marca | 48 |
| Figura 2.10 | Láminas de aluminio compactadas dentro de crisol | 49 |
| Figura 2.11 | Crisol listo para fundición | 50 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 3.1 | Variación de la cantidad de material desagregado con respecto al tiempo, 840 g de envases multicapa en 100 L de agua. | 62 |
| Figura 3.2 | Variación de la cantidad de material desagregado con respecto al tiempo, 1 120 g de envases multicapa en 100 L de agua. | 64 |
| Figura 3.3 | Láminas de polietileno/aluminio | 65 |
| Figura 3.4 | Lámina de polietileno aluminio contaminada con pulpa de papel | 66 |
| Figura 3.5 | Pérdida de masa de las láminas de polietileno/aluminio en el proceso de lixiviación con solventes con respecto al tiempo. | 72 |
| Figura 3.6 | Comparación de las láminas obtenidas del proceso de lixiviación: a) lixiviación con xileno puro, b) lixiviación con xileno/etanol 1:1, b) lixiviación con tricloro benceno puro, d) lixiviación con tricloro benceno/etanol 1:1 | 74 |
| Figura 3.7 | Comparación de láminas luego de desagregación y luego de lixiviación: a) aluminio obtenido de lixiviación con xileno, b) y c) polietileno/aluminio del proceso de desagregación. | 75 |
| Figura 3.8 | Recuperación de solvente | 77 |
| Figura 3.9 | Recuperación de fase metálica con variación de temperatura, para 30 minutos de fusión, 200 % de carga fundente de NaCl (50%) y KCl (50 %) | 80 |
| Figura 3.10 | Recuperación de fase metálica en la fundición con variación de tiempo, para fusión a 750°C, 200 % de carga fundente de NaCl (50 %) y KCl (50 %) | 82 |
| Figura 3.11 | Recuperación de fase metálica en la fundición con variación del porcentaje de carga fundente con respecto al aluminio inicial para fundición, para fusión a 750°C durante 30 minutos | 84 |
| Figura 3.12 | Recuperación de fase metálica de la fundición con variación de tiempo, para fusión a 750°C durante 30 minutos, 200 % de carga fundente de NaCl (50 %) y KCl (50 %) | 86 |
| Figura 3.13 | Fotografía tomada por microscopía electrónica a 200 aumentos de la muestra de aluminio fundido | 92 |
| Figura 3.14 | Fotografía tomada por microscopía electrónica a 3000 aumentos de la muestra de aluminio fundido | 93 |

| | | |
|------------------------|--|-----|
| Figura 3.15 | Difractograma de de la muestra de aluminio fundido. | 95 |
| Figura 3.16 | Diagrama de flujo y balance de masa para una planta de recuperación de aluminio a partir de envases multicapa con una capacidad de 10 t diarias, con lixiviación de polietileno con xileno | 98 |
| Figura 3.17 | Diagrama de flujo y balance de masa para una planta de recuperación de aluminio a partir de envases multicapa con una capacidad de 10 t diarias, sin lixiviación de polietileno | 101 |
| Figura 3.18 | Vista superior de la distribución de equipos en el interior de la planta | 110 |
| Figura 3.19 | Vista superior del dimensionamiento exterior de la planta | 112 |
| Figura A.II.1 | Diagrama de fase para la mezcla NaCl-NaF | 143 |
| Figura A.II.2 | Diagrama de fase para la mezcla CaCl ₂ -MgCl ₂ | 144 |
| Figura A.II.3 | Diagrama de fase para la mezcla NaCl-Na ₂ SO ₄ | 145 |
| Figura A.II.4 | Diagrama de fase para la mezcla KF-NaF | 146 |
| Figura A.II.5 | Diagrama de fase para la mezcla KCl-CaCl ₂ | 147 |
| Figura A.III.1 | Tanque desagregador | 148 |
| Figura A.III.2 | Tanque de lixiviación | 149 |
| Figura A.III.3 | Tamiz vibratorio | 151 |
| Figura A.VII.1 | Resultado de análisis químico semicuantitativo mediante analizador de rayos X de microscopio electrónico para región observada a 200 aumentos | 176 |
| Figura A.VII.2 | Resultado de análisis químico semicuantitativo mediante analizador de rayos X de microscopio electrónico para región observada a 3000 aumentos | 177 |
| Figura A.VIII.1 | Difractograma de de la muestra de aluminio fundido | 178 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| ANEXO I | |
| Hojas de seguridad de los solventes | 139 |
| ANEXO II | |
| Diagramas de fase de mezclas binarias | 144 |
| ANEXO III | |
| Características de los equipos | 149 |
| ANEXO IV | |
| Ensayos de desagregación | 155 |
| ANEXO V | |
| Ensayos de lixiviación | 159 |
| ANEXO VI | |
| Ensayos de fundición | 169 |
| ANEXO VII | |
| Resultados del análisis por microscopía electrónica de barrido con analizador de rayos x | 177 |
| ANEXO VIII | |
| Difractograma de la muestra de aluminio fundido | 179 |

RESUMEN

Se ha desarrollado un proceso para la recuperación de aluminio de envases multicapa mediante desagregación agitada, lixiviación de polietileno con solventes orgánicos y fusión con sales fundentes.

La desagregación de los envases multicapa se realiza con agua en un tanque con agitación, este proceso permite separar el papel (75 %) y obtener láminas de polietileno/aluminio. La lixiviación con xileno (98 %) y tricloro benceno (98 %) de las láminas de polietileno/aluminio, disuelve las capas de polietileno de baja densidad (20 %) para recuperar finas láminas metálicas.

La fundición del residuo metálico se realiza en un horno de crisol a 750 °C durante 30 minutos, con la adición de una mezcla de sales fundentes compuesta por cloruro de sodio (NaCl 47,5 %), cloruro de potasio (KCl 47,5 %) y fluoruro de potasio (KF 5 %). La recuperación de fase metálica del proceso de fundición es 50 %, el análisis químico por espectrometría de chispa determina que la fase metálica está compuesto por 97 % Al, 1 % Si y 0,9 % Fe. La fusión directa de las láminas de polietileno/aluminio sin lixiviación, recuperan sólo el 21 % de fase metálica.

Se realizó un estudio económico preliminar y se estableció que para la planta de procesamiento de 200 t de envases multicapa por mes, con etapa de lixiviación de polietileno con xileno, la tasa interna de retorno 59,0 %, la relación beneficio costo de 1,1 y el valor actual neto es 215 565,00 USD. Para la planta sin etapa de lixiviación, la tasa interna de retorno es 5,0 %, la relación beneficio costo es de 1,0 y el valor actual neto es 196 094,00 USD

Los indicadores económicos obtenidos, determinan que la planta de recuperación de aluminio con etapa de lixiviación es la más adecuada para la inversión.

INTRODUCCIÓN

El aluminio es el segundo metal más abundante en el mundo. Constituye el 8 % de la corteza terrestre pero los procesos para obtener aluminio metálico a partir de los minerales de aluminio son muy costosos (Totten y Mackenzie, 2003, p.1)

El aluminio es el metal no ferroso con mayor consumo a nivel mundial, 24 millones t/año. Cerca de 75 % de la producción de aluminio corresponde a aluminio primario, el cual se extrae de la bauxita y el resto de la producción de aluminio secundario, es el que se obtiene de reprocesar escoria metálica o del reciclaje de piezas de aluminio desechadas. La producción de 1 t de aluminio a partir de la bauxita requiere 17 000 kWh mientras que la misma cantidad de aluminio producido a partir de aluminio reciclado consume tan solo 750 kWh (Totten y Mackenzie, 2003, p.1).

Los envases multicapa deben sus propiedades a su fabricación en capas laminadas. Cada capa es de un material diferente y apropiado para una función concreta. El cartón constituye el 75 % del peso del envase y le proporciona rigidez y resistencia. El polietileno representa el 20% del peso del envase y su función es mantener unidas las distintas capas. La lámina de aluminio del 5 % del peso del envase evita la entrada de oxígeno convirtiéndose en una barrera que permite mantener las condiciones contenidas durante más tiempo (Fondo Nacional del Ambiente-Perú, 2008, p. 5; Abreu, 2002, p. 3).

Existe un método de recuperación de aluminio patentado por el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional que consiste en tratamiento térmico por pirólisis de los envases multicapa en el cual el plástico y el papel sirven como combustible. Este método permite la obtención de aluminio con el 98 % de pureza, con la desventaja que no se puede recuperar la pulpa de cartón que también

constituye un residuo reciclable de los envases multicapa y tiene gran interés en la industria (Endara, 2004, p. 103).

El reciclaje de los envases desechados se viene realizando con éxito en algunos países, como por ejemplo Brasil, Costa Rica, Argentina, Canadá. La tecnología utilizada es accesible y los productos que se obtienen son material aglomerado y en algunos casos pulpa de cartón. Este tipo de materiales se transforman en materia prima para la industria de la construcción y del papel, por tanto el reciclaje de estos envases ya tiene un mercado en la actualidad (Abreu, 2002, p. 11)

La recuperación de la pulpa de cartón se la realiza mediante un agitador, donde se mezclan los envases de cartón con agua a temperatura ambiente, se logra separar el cartón del resto de los componentes y las fibras de papel se vuelven a convertir en pulpa para fabricar papel, cartulina, cartón, elementos de librería, toallas para uso doméstico y papel kraft de alta resistencia (Abreu, 2002, p.5 ; Lopes y Felisberti, 2005, p. 3183).

El reciclaje de pulpa de cartón produce un beneficio para el medio ambiente ya que 1000 kg de papel de desecho procesado mediante agitación mecánica permite dejar de utilizar 2 m³ de madera lo que corresponde a aproximadamente 150 m² de bosque. Un factor muy importante para el reciclaje de los envases multicapa, con el objetivo de obtener pulpa de papel y aluminio, es el consumo de energía. La producción de papel a partir de la industrialización de la madera requiere cantidades altas de energía, alrededor de tres veces más energía que la necesaria para la producción de papel a partir de papel reciclado (Abreu, 2000, p. 3).

El presente trabajo busca aportar con un nuevo proceso para el reciclaje de envases multicapa que permita recuperar el aluminio y pulpa de papel. Este estudio pretende aprovechar la mayor cantidad de componentes de los envases multicapa y de esta manera colaborar con el cuidado del ambiente con la gestión de los residuos sólidos y la reducción de materia prima y energía que involucra este proceso de reciclaje.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. ENVASES MULTICAPA CON LÁMINA DE ALUMINIO

Los envases multicapa sirven para contener y preservar diversos tipos alimentos líquidos como: lácteos y jugos. Son ampliamente utilizados en la industria alimenticia, debido a que permiten almacenar bebidas perecibles aproximadamente 6 meses sin necesidad de refrigeración (Fondo Nacional del Ambiente-Perú, 2008, p. 5).

Otras de las ventajas que presentan este tipo de envases son: peso ligero, buena resistencia mecánica, y su condición de descartables que sin embargo han propiciado aumento de la contaminación por residuos sólidos en las ciudades. Este problema ambiental se incrementa por la dificultad de reciclaje en comparación con el proceso de reciclaje de envases de plástico y de vidrio (Fondo Nacional del Ambiente-Perú, 2008, p. 5).

La industria de los envases multicapa ha ido mejorando desde su apareamiento, obteniendo nuevas formas, productos y sobre todo, nuevas tecnologías para la preservación del líquido en su interior. Es así que en el año de 1961 se incorporo al mercado de empaques para alimentos el envase multicapa aséptico (Abreu, 2002, p. 2; Inche, Vergiú, Mavila, Godoy y Chung, 2004, p. 9).

El envase multicapa aséptico se caracteriza por poseer una lámina de aluminio dentro de sus capas. El aluminio se convierte en una barrera adicional para proteger el contenido del empaque. Además los envases asépticos incluyen un tratamiento térmico a altas temperaturas y periodos cortos de tiempo para esterilizar el producto que van a contener (Abreu, 2002, p. 2; Inche et al, 2004, p. 9).

1.1.1. CARACTERÍSTICAS DE ENVASES MULTICAPA ASÉPTICOS

Los envases multicapa pueden estar compuestos por 6 ó 7 láminas de distintos materiales, papel, polietileno de baja densidad, y aluminio cuando se trata de envases asépticos. Un envase de un litro de capacidad pesa aproximadamente 28 gramos. (Abreu, 2002, p. 3; Lopes y Felisberti, 2005, p. 3183)

Inicialmente los envases multicapa se caracterizaron por requerir menos cantidad de material para su elaboración que empaques de cartón y por incluir capas de polietileno. Debido a que no existe contacto entre el líquido en el interior del empaque y la lámina de papel que compone el envase, no es necesario reforzar el material contra la humedad (Inche et al, 2004, p. 9).

La unión de las láminas para formar la multicapa de materiales se realiza mediante temperatura. La unión de láminas de aluminio y polietileno utiliza un material de adhesión llamado ácido etileno metacrílico (EMMA), formando un material compuesto por polietileno y aluminio conocido como PEAL (Araujo, do Carmo y Felisberti, 2007, p. 2524).

1.1.2. COMPONENTES DE LOS ENVASES MULTICAPA ASÉPTICOS

Los envases multicapa asépticos se componen de láminas de polietileno, cartón, y aluminio. El porcentaje en peso de cada elemento es 75 % de cartón, 20 % de polietileno de baja densidad y 5 % de aluminio (Araujo et al, 2007, p. 2525).

Cada lámina de los componentes del envase multicapa cumple una función específica con el objetivo de preservar el contenido en el interior del envase y de mantener la estructura y forma exterior. (Abreu, 2002; Diputación foral de Bizkaia, 2007).

El cartón es el mayor componente de los envases multicapa. Las propiedades que le brinda al envase son rigidez y resistencia por lo tanto proporciona y mantiene la apariencia de cada tipo de envase. La lámina de cartón que se utiliza para la fabricación de los envases multicapa proviene de pulpa de papel que cumple con requerimientos especiales para el contacto con alimentos, debido a esto no se puede utilizar papel reciclado para la producción de este tipo de envases (Abreu, 2002, p3; Diputación foral de Bizkaia, 2007, p. 12).

El segundo componente mayoritario de los envases multicapa es el polietileno de baja densidad, este material se encuentra formando varias capas. Las láminas de polietileno cumplen dos funciones principales. La primera es proporcionar estanqueidad, es decir mantener el material protegido de la humedad. La segunda utilidad del polietileno es mantener unidas las diferentes capas del envase. Las láminas de polietileno de baja densidad se utilizan en espesores mínimos con el objetivo de optimizar los recursos, por ejemplo la lámina exterior de polietileno tiene tan solo 12 μm de espesor (Abreu, 2002, p3; Diputación foral de Bizkaia, 2007, p. 12).

El aluminio es el componente de los envases multicapa que se encuentra en menor porcentaje del total del peso del empaque. La utilización de este material caracteriza a los envases multicapa asépticos. La lámina de aluminio de los envases multicapa es una barrera que protege el contenido del envase contra el oxígeno y la luz del exterior. Además esta barrera evita el contacto de olores y sabores externos. Las ventajas que proporciona la capa de aluminio de los envases asépticos permiten mayor tiempo de almacenamiento a temperatura ambiente por lo tanto genera un ahorro en energía ya que no requieren refrigeración para mantener su contenido en buenas condiciones. La lámina de aluminio tiene un espesor de 6,5 μm (Diputación foral de Bizkaia, 2007, p 12; El Hagggar, 2007, p 181).

Para la producción de envases multicapa asépticos, los componentes son colocados en etapas o láminas de material, para que sus características se complementen. La

unión de las diferentes láminas se realiza por medios térmicos, dejando un material laminado compacto, que se puede manipular para dar la forma a los diferentes tipos de envases (El Hagggar, 2007, p. 181).

Iniciando por la capa exterior de un envase multicapa aséptico, la primera lámina corresponde a polietileno de baja densidad. Este recubrimiento externo protege la tinta de la etiqueta y evita el contacto de la humedad con la siguiente capa que corresponde al papel (El Hagggar, 2007, p. 181).

La segunda capa del material laminado es la de papel, esta etapa proporciona al envase características de resistencia que le permiten mantener su apariencia externa, sobre todo para soportar cargas durante su almacenamiento y transporte (Diputación foral de Bizkaia, 2007, p. 12).

La siguiente etapa corresponde a una lámina de polietileno de baja densidad cuya finalidad es la de servir de unión entre la lámina de cartón y la siguiente capa de aluminio (Diputación foral de Bizkaia, 2007 p 12; El Hagggar, 2007, p. 181).

La cuarta capa del material que compone a los envases está constituida por una fina lámina de aluminio, esta etapa es la que caracteriza a los envases asépticos. Esta capa se encuentra recubierta por dos láminas de polietileno (Dunais, 2009, p. 6).

La última etapa del material es la que está en contacto con el contenido del envase, y está compuesta por polietileno de baja densidad (Dunais, 2009, p 6).

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de las láminas que componen un envase multicapa aséptico y de que material se compone cada una de ellas.

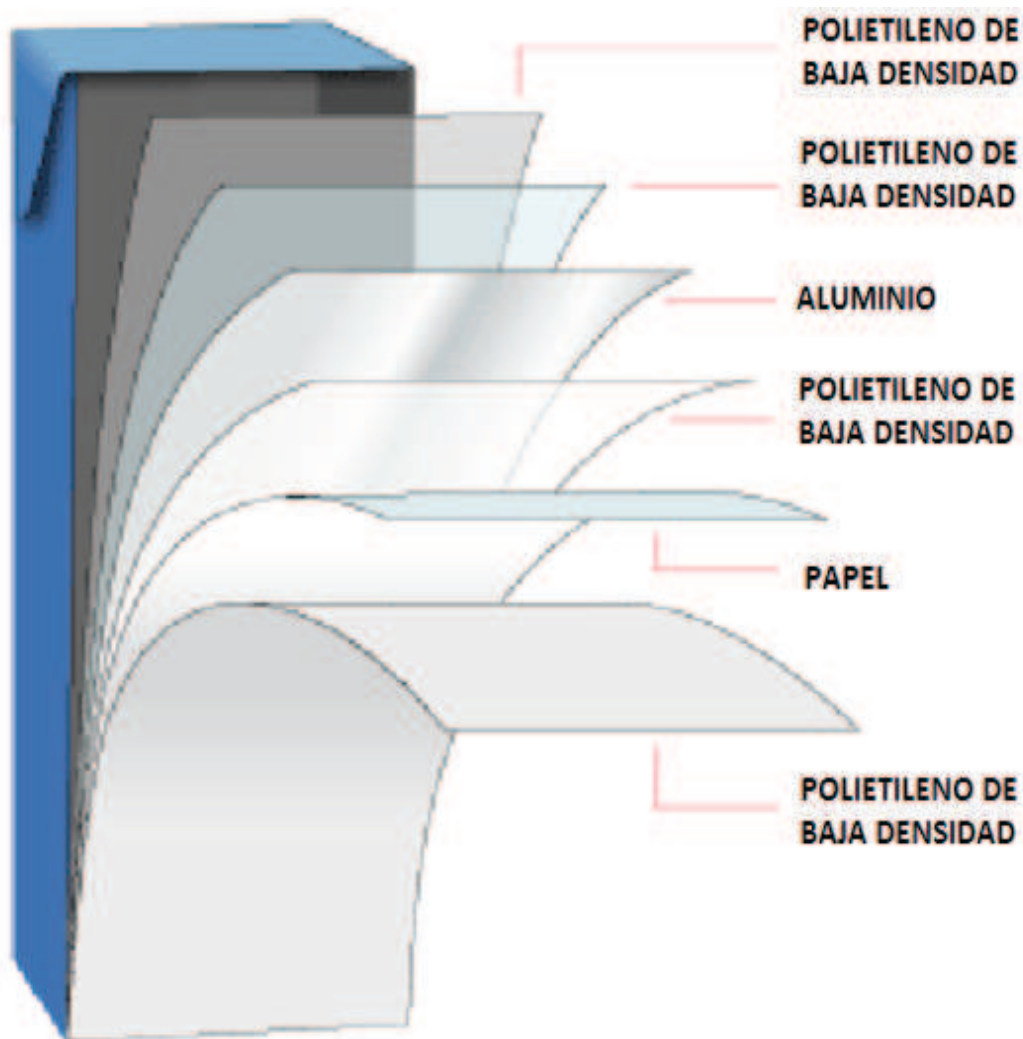


Figura 1.1 Capas de un envase multicapa aséptico
(Dunais, 2009, p. 6)

1.2. MÉTODOS DE RECICLAJE DE ENVASES MULTICAPA

La cantidad de desechos generados por la utilización de envases multicapa es cada vez mayor debido a su condición de descartables y al aumento del consumo de productos empacados con esta tecnología. El incremento de residuos sólidos está provocando graves problemas ambientales en las ciudades (Fondo Nacional del Ambiente-Perú, 2008, p. 5).

Por lo tanto es necesario un manejo adecuado de este tipo de desechos para lo cual la mejor opción es su reciclaje, aunque este proceso puede ser complejo de acuerdo al producto final que se quiera obtener (Charlier y Sjöberg, 1995, p. 12).

Existen varias metodologías de reciclaje del material laminado de los envases multicapa. Uno de los métodos de reciclaje es utilizar envases desechados directamente como materia prima para la fabricación de aglomerados para diferentes aplicaciones, esto constituye un proceso simple en el cual no se realiza separación de cada uno de los componentes del material laminado de los envases, sino que se lo utiliza como material compuesto (Chung, 2003, p. 83).

Existe la posibilidad de reciclaje de cada uno de los materiales que componen los envases multicapa asépticos, con el objetivo de obtener pulpa de papel, parafina y aluminio puro. El reciclaje de pulpa de papel a partir de los envases multicapa tiene una metodología ampliamente conocida y se considera bastante simple, pero el manejo del material polietileno/aluminio es más complejo (Charlier y Sjöberg 1995, p. 12).

1.2.1. RECICLAJE SIN SEPARACIÓN DE CAPAS

El material proveniente de envases multicapa asépticos de desecho puede ser reciclado de manera directa, es decir sin un tratamiento de separación de capas, para la fabricación de material aglomerado. De esta manera se aprovecha las propiedades del cartón, polietileno y del aluminio para generar un material compuesto (Chung, 2003, p. 83).

El proceso de fabricación de material aglomerado a partir de los envases multicapa con lámina de aluminio es relativamente sencillo y solo requiere como materia prima los desechos de los envases. Las principales etapas que requiere la fabricación de

las planchas aglomeradas son trituración del material y prensado con calentamiento (Inche et al, 2004, p. 11).

La elaboración de los tableros aglomerados empieza con la recolección de materia prima que corresponde a los envases multicapa de desecho los cuales deben ser lavados para eliminar cualquier tipo de residuo en su interior (Dominguez y Pacheco 2010, p.193; Reyes, 2007, p. 57).

La primera etapa del proceso industrial es la disminución del tamaño del material, esta operación se lleva a cabo en una trituradora. El tamaño de partícula al que se debe llegar es de 3 mm. En la siguiente etapa el material previamente triturado es dosificado en moldes para formar paneles aglomerados de acuerdo a las dimensiones de los mismos y a la capacidad de la producción (Dominguez y Pacheco 2010, p.193; Reyes, 2007, p. 57).

La última parte de la fabricación de paneles aglomerados corresponde a la etapa de prensado del material. Durante la compresión el material es sometido a 170°C, por efecto de la temperatura el polietileno se funde produciendo una matriz, en la cual el aluminio y el papel actúan como refuerzo para formar el material compuesto final (Dominguez y Pacheco 2010, p.193; Reyes, 2007, p. 57).

Luego del proceso de prensado se obtienen paneles de material compuesto cuya composición es similar a la de los envases multicapa de los cuales provienen. Es decir que los paneles contienen 75 % de papel, 20 % de polietileno de baja densidad y 5 % de aluminio (Reyes, 2007, p. 57).

El proceso completo de la fabricación de tableros aglomerados a partir de envases multicapa con lámina de aluminio post consumo se muestra en la Figura 1.2.

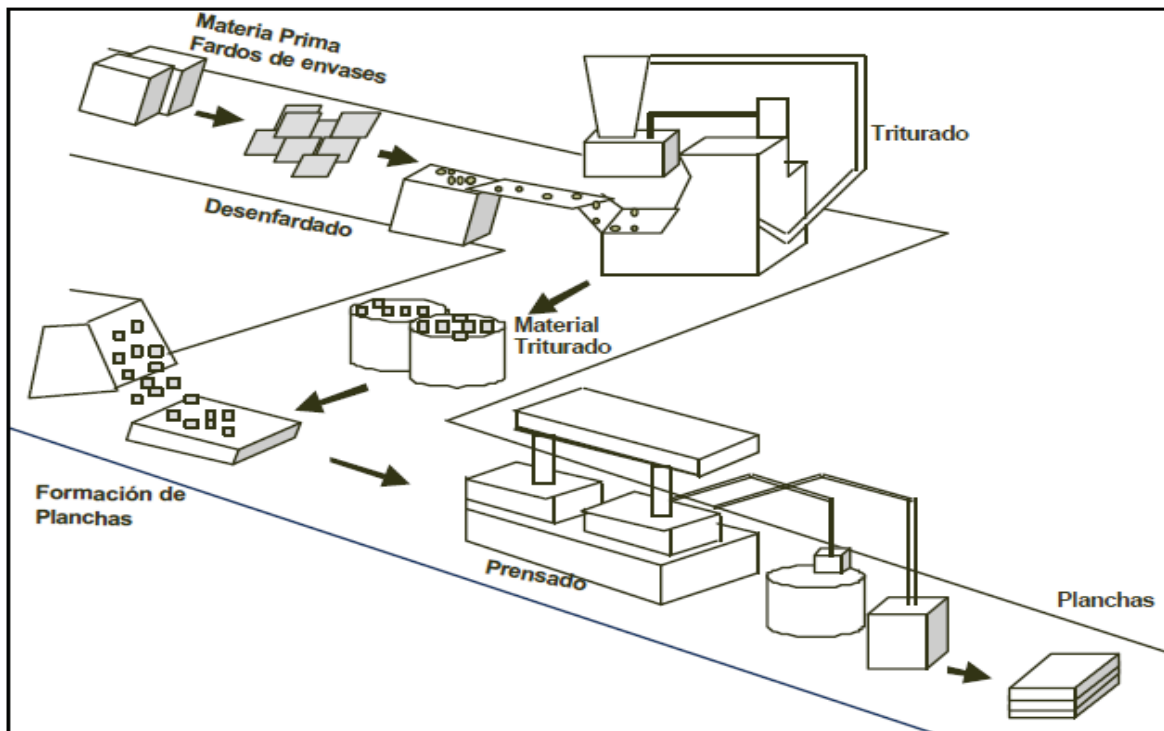


Figura 1.2 Proceso de fabricación de tableros aglomerados
(Inche et al, 2004, p. 11)

1.2.2. RECICLAJE DE PULPA DE PAPEL

La lámina de cartón de los envases multicapa se fabrica con pulpa de papel de buena calidad para garantizar la calidad del material en cuanto a resistencia y a limpieza para poder ser utilizado en empaques de alimentos (Abreu, 2000, p. 7; El Hagggar, 2007, p. 181).

La calidad del papel con el que se elaboran los envases multicapa facilita el proceso de reciclaje además permite obtener pulpa de papel secundaria de alta calidad. Por esta razón el reciclaje de papel a partir de desechos provocados por envases multicapa es ampliamente aplicado alrededor del mundo (Abreu, 2000, p. 7; El Hagggar, 2007, p. 181).

Los envases multicapa post consumo son un material que puede ser fácilmente procesado por varios métodos agitación con agua el objetivo de separar la lámina de cartón del resto del envase. El proceso de separación de la lámina de papel requiere de un tiempo relativamente corto, aproximadamente 10 a 30 minutos dependiendo de la carga y del equipo en que se trabaje. El equipo en el que se realiza el proceso es un desagregador (Abreu, 2000, p. 10; Neves y von Zuben, 1999, p. 2).

El desagregador es un tanque con agitación mecánica que puede tener instalaciones para calentamiento, aunque para el procesamiento de envases multicapa asépticos no es necesario aplicar temperatura al proceso. Un esquema gráfico de la estructura de un tanque desagregador se muestra en la Figura 1.3 (El Hagggar, 2007, p. 182).

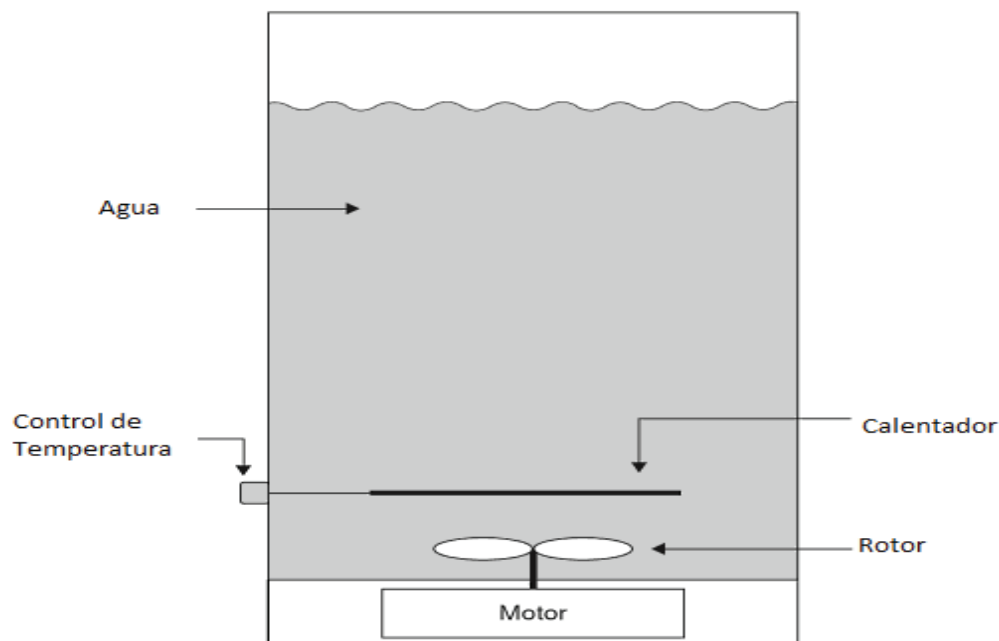


Figura 1.3 Esquema de un desagregador
(El Hagggar, 2007, p. 186)

El proceso de separación de la lámina de papel del resto del envase se produce debido a dos factores principales, la hidratación del papel por el contacto con el agua y la agitación mecánica que produce fricción entre los envases.

El calentamiento del agua que se utiliza para la separación de la pulpa de papel, puede facilitar el proceso, pero no es indispensable. La desagregación de las fibras de papel no requiere adicionar ningún tipo de químicos durante el proceso. Estas dos características hacen que esta etapa de separación no constituya un problema en cuanto al manejo económico ni tecnológico de una planta para su procesamiento (Abreu, 2000, p. 5; Neves y von Zuben, 1999, p. 2).

Los envases multicapa post consumo que van a ser procesados para separar la pulpa de papel se introducen en el equipo de desagregación. La cantidad de empaques multicapa en relación a la cantidad de agua que se añade al proceso puede variar entre 3 % hasta 15 % (von Zuben, 2002, p. 724).

La limpieza de la pulpa que se obtiene es un factor importante para su posterior utilización para la fabricación de papel. Existen dos maneras de obtener pulpa de alta calidad en cuanto a su limpieza. Uno de los métodos que se utiliza para mejorar la pulpa es mezclar los envases desechados con residuos de papel regular, de esta manera se recicla ambos residuos y se obtiene mayor cantidad de pulpa de papel de una mejor calidad. Otra manera de obtener pulpa limpia es utilizando un tanque de lavado (Abreu, 2002, p. 5).

Luego de concluido el proceso de desagregación, la pulpa suspendida en el equipo es bombeada para su salida por la parte inferior del desagregador. El material que contiene la fibra de papel pasa por un proceso de separación para retener cualquier residuo de polietileno y aluminio. Esta separación puede realizarse de mejor manera en un tamiz vibratorio, aunque basta con una placa perforada que permita el paso de la pulpa y retenga el material de mayor tamaño que corresponde al resto del material de los envases (Neves y von Zuben, 1999, p. 4).

Una de los tratamientos que puede realizarse con la pulpa de papel obtenida es su introducción en un proceso de reciclaje de papel para continuar con su procesamiento. Si no se cuenta con la infraestructura para el reciclaje de papel,

entonces es necesario un tratamiento de secado. La remoción de la humedad de la pulpa de papel se realiza en un equipo desaguador en el cual se obtiene un material con humedad entre 60 % y 70 % (Charlier y Sjoberg, 1995, p. 12; Neves y von Zuben, 2005, p. 4).

1.2.3. RECICLAJE DE LÁMINA DE POLIETILENO/ALUMINIO

La separación de las láminas de los envases multicapa tiene dos etapas, la primera es la recuperación de pulpa de papel, y la segunda es el tratamiento que se le da al residuo constituido por una lámina de aluminio y polietileno fuertemente unidos cuya separación es más compleja (Charlier y Sjoberg, 1995, p.12).

1.2.3.1. Material compuesto polietileno/aluminio

Una vez que se ha retirado la lámina de cartón de los envases multicapa se obtiene un material constituido por polietileno y aluminio. Este residuo puede ser utilizado directamente como materia prima para la producción de láminas de material compuesto con polietileno como matriz, reforzado con aluminio (Charlier y Sjoberg 1995, p.12; Hidalgo, 2011, p. 232).

El material compuesto de polietileno y aluminio contiene también una pequeña cantidad de un copolímero llamado ácido polietilenmetacrílico. La mezcla de estos tres componentes se conoce como PEAL (Lopes y Felisberti, 2006, p. 3183; Neves y von Zuben, 1999, p. 13).

La Tabla 1.1 presenta una comparación de las principales propiedades mecánicas entre el material compuesto de polietileno y aluminio (PEAL) y polietileno de baja densidad puro.

Tabla 1.1 Comparación de las propiedades entre polietileno de baja densidad y el material compuesto de polietileno y aluminio.

| Resistencia a la Tensión (MPa) | | Deformación (%) | | Módulo de Elasticidad (MPa) | |
|-----------------------------------|-------|--------------------|--------|--------------------------------|-------|
| PEAL | PEBD | PEAL | PEBD | PEAL | PEBD |
| 10,97 | 11,30 | 38,86 | 116,70 | 177,60 | 95,37 |

(Neves y von Zuben, 1999, p. 13)

Las aplicaciones del PEAL son similares a las de los aglomerados de empaques multicapa sin separación de capas, es decir en construcción para la fabricación de techos y en decoración. También puede ser utilizado como material de ingeniería para algunas aplicaciones como rieles para cables y piezas especiales (Hidalgo, 2011, p. 234; Neves, 2004, p. 7).

1.2.3.2. Pirólisis de láminas polietileno/aluminio

La pirólisis es un tratamiento térmico con temperatura moderadamente alta, en el cual se puede controlar la atmósfera de trabajo mediante gases como nitrógeno y monóxido de carbono. Al generar una atmósfera reductora se puede evitar la oxidación del material. Los gases de combustión pueden provocar un efecto reductor y favorecer la pirólisis (de Marco, Caballero, Torres, Laresgoiti, Chomón y Cabrero 2002, p. 818).

Durante la pirólisis el material orgánico volátil generando gases y líquidos que pueden ser utilizados como combustible o como fuente de compuestos químicos para otros procesos (de Marco et al, 2002, p. 818).

El material orgánico no volátil el cual no se ve afectado por el proceso de pirólisis, puede ser procesado para recuperar materiales valiosos que contenga (de Marco et al, 2002, p. 818).

Este proceso puede utilizarse para el reciclaje de cualquier tipo de plástico, y no requiere de un tratamiento de limpieza previo para su procesamiento como si es el caso para el reciclado mecánico. Por esta razón la pirólisis es un proceso adecuado para el reciclaje de mezclas de polímeros con otros materiales como pinturas, papel y madera (de Marco et al, 2002, p. 818).

Una ventaja adicional de la pirólisis en comparación con otros procesos térmicos de descomposición como la incineración, es que la generación de cenizas es mínima y que las emisiones de gases producto de la combustión no son tan peligrosas (de Marco et al, 2002, p. 818).

El producto de la pirólisis de envases multicapa es una delgada lámina de aluminio muy frágil y de baja densidad. A pesar de la atmósfera reductora con la que se opera el horno, puede producirse oxidación de la lámina de aluminio, además durante la pirólisis cierta cantidad de carbón se deposita en la superficie del producto (Charlier y Sjoberg, 1995, p. 12).

Las láminas de aluminio obtenidas del proceso de pirólisis de los envases multicapa, deben ser fundidas con el objetivo de obtener un material de alta pureza y resistencia, ya que las laminas de la pirólisis son frágiles se requiere formar lingotes de aluminio para su comercialización (Charlier y Sjoberg, 1995, p. 12).

Un proceso de pirólisis para la recuperación de aluminio de los envases multicapa se desarrollo en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional. El proceso de recuperación, desarrollado en un horno mono-solera con atmósfera reductora ($\lambda=0,78$) y 580°C , obtiene aluminio de 98 % de pureza. Donde λ representa la relación entre el volumen de aire efectivo y el volumen de aire estequiométrico necesario para la combustión completa (Endara, 2004, p.1).

En la metodología experimental utilizada por Endara (2004) para la pirólisis de los envases multicapa se opera en un horno de lecho agitado a 4 revoluciones por

minuto. Los parámetros estudiados fueron: la relación de volumen de aire efectivo y aire estequiométrico, la temperatura y el tiempo de operación (p. 58). Los resultados de recuperación de aluminio metálico mediante pirólisis de envases multicapa se detalla en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Condiciones de trabajo para ensayos de pirólisis y productos obtenidos

| Ensayo | λ | Temp (°C) | Tiempo (h) | Envases multicapa (g) | Láminas metálicas en (g) | Residuo no metálico (g) | Recuperación de laminas metálicas (%) |
|--------|-----------|-----------|------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,62 | 520 | 1 | 1866,0 | 92,0 | 465,0 | 4,9 |
| 2 | 0,78 | 580 | 5 | 3802,0 | 176,0 | 579,0 | 46 |
| 3 | 1,06 | 580 | 3 | 1821,0 | 92,0 | 420,0 | 5,1 |
| 4 | 1,5 | 640 | 2 | 1246,0 | 46,0 | | 3,7 |

(Endara, 2004, p. 67)

Las láminas metálicas obtenidas de la pirólisis, se sometieron a fundición para obtener aluminio puro. Los ensayos de fundición se realizaron en una mufla artesanal dentro del rango de temperatura de 700-1000°C. Para la fundición de las láminas se añadió sales de cloro y de amonio (Endara, 2004, p. 59).

Los resultados obtenidos por Endara en la recuperación de aluminio de la fundición de láminas metálicas se muestran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Condiciones de fundición de láminas metálicas obtenidas en pirólisis ($\lambda=0,78$) y porcentaje de fase metálica

| Muestra | Parámetros | Masa fundida | Fase metálica (%) |
|---------|------------------------------|--------------|-------------------|
| M1 | Sin fundentes | 100,0 | 35,0 |
| M2 | 20 % NaCl | 50,0 | 19,3 |
| M3 | 11 % NaCl+NH ₄ Cl | 18,0 | 1,1 |

(Endara, 2004, p. 70)

En la Tabla 1.4 se muestra el análisis químico del material obtenido de la fundición de láminas metálicas, producto de la pirólisis de envases multicapa. El análisis químico se realizó por absorción atómica

Tabla 1.4 Composición de las muestras del resultado de la fundición de láminas metálicas obtenidas por pirólisis de envases multicapa

| Elemento | M1 | M2 | M3 |
|----------|---------------|-----------|------------------------------|
| | Sin fundentes | 20 % NaCl | 11 % NaCl+NH ₄ Cl |
| Al | 98,40 | 96,90 | 80,90 |
| Fe | 1,60 | 0,40-1,60 | 0,40 |
| Si | - | 0,08 | 0,30 |
| Pb | - | 0,00 | 0,20 |
| Zn | - | 0,00 | 0,02 |
| Ag | - | 0,00 | 0,01 |
| Cr | - | - | 0,00 |

(Endara, 2004, p. 74)

1.2.3.3. Tecnología de separación por plasma

El plasma térmico es una tecnología de calentamiento que permite trabajar a temperaturas excesivamente altas llegando hasta 15 000°C en el interior de un recipiente industrial. Estas condiciones de alta temperatura no pueden ser alcanzadas por hornos industriales que funcionen con combustible (Neves, 2004, p. 9; von Zuben, 2002, p. 722). Un ejemplo de antorcha para generar plasma se muestra en la Figura 1.4.



Figura 1.4 Antorcha de plasma
(von Zuben, 2002, p. 727)

En el interior de la antorcha, los electrones transfieren parte su energía cinética al gas, de esta manera se aumenta la temperatura y se produce la ionización. Al tratarse de un proceso en el interior del un reactor la pérdida de energía es mínima y por lo tanto se facilita alcanzar altas temperaturas (Neves, 2004, p. 9; von Zuben, 2002, p. 722).

La utilización de plasma térmico en procesos de reciclaje de envases multicapa permite la separación del aluminio que se obtiene como metal puro, y de polietileno que se produce como un residuo de parafina. Al utilizar este tipo de hornos se minimiza la oxidación del aluminio de los envases multicapa ya que no requiere de oxígeno para la combustión por lo tanto se trabaja en atmósfera inerte (El Hagggar, 2007, p. 184).

El material que se obtiene mediante esta tecnología presenta un alto contenido de aluminio y muy poco contenido de impurezas, el análisis químico del aluminio obtenido por plasma térmico se presenta en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Análisis químico de aluminio obtenido por plasma térmico

| Elemento | Porcentaje (%) | Elemento | Porcentaje (%) |
|----------|----------------|----------|----------------|
| Al | 98,50 | Zn | 0,04 |
| Si | 0,39 | Ti | 0,02 |
| Fe | 0,84 | V | 0,01 |
| Cu | 0,02 | Pb | 0,03 |
| Mn | 0,02 | Na | 0,00 |
| Mg | 0,00 | Ca | 0,00 |
| Cr | 0,01 | Cd | 0,00 |

(von Zuben, 2002, p. 726)

1.3. LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO CON SOLVENTES

El polietileno es un material sintético que puede ser disuelto mediante la aplicación de solventes específicos bajo ciertas condiciones (Bermudez, 1990, p. 36)

1.3.1. POLIMEROS

Los polímeros son moléculas orgánicas de gran tamaño, de peso molecular variable entre 10 000 y 1 000 000 g/gmol. Estas macro moléculas se forman por la unión de pequeñas moléculas mediante un proceso llamado polimerización o por la alteración de moléculas grandes existentes en la naturaleza como la celulosa. Las características y propiedades de los polímeros dependen de su peso molecular. (Askeland, 1985, p. 326; McMurry, 2008, p. 239).

Los polímeros se caracterizan por ser ligeros, resistentes a la corrosión, aislantes eléctricos, tener baja resistencia a la tensión y a la temperatura. Sus aplicaciones son variadas como: materia prima para la fabricación de juguetes, artículos para el hogar y decorativos hasta como materiales para ingeniería como recubrimientos, pinturas, adhesivos neumáticos, piezas para automóviles, y blindajes (Askeland, 1985, p. 326).

Comportamiento de polímeros termoplásticos respecto a la temperatura

Cuando un polímero es sometido a temperaturas excesivamente elevadas, los enlaces covalentes que unen los átomos se pueden romper, entonces el polímero se carboniza. La temperatura a la cual se produce la carbonización se conoce como temperatura de degradación (Askeland, 1985, p. 338).

A temperaturas altas los polímeros termoplásticos presentan viscosidad baja, las cadenas pueden moverse sin necesidad de aplicar fuerzas externas. El polímero bajo estas condiciones de temperatura es adecuado para su procesamiento mediante vaciado o conformado (Askeland, 1985, p. 339).

A medida que la temperatura disminuye, la viscosidad aumenta y se dificulta el movimiento de las cadenas. Al llegar a la temperatura de fusión el polímero pasa a estado sólido como se muestra en la Figura 1.5. En este estado el material polimérico presenta características de rigidez. (Askeland, 1985, p. 339)

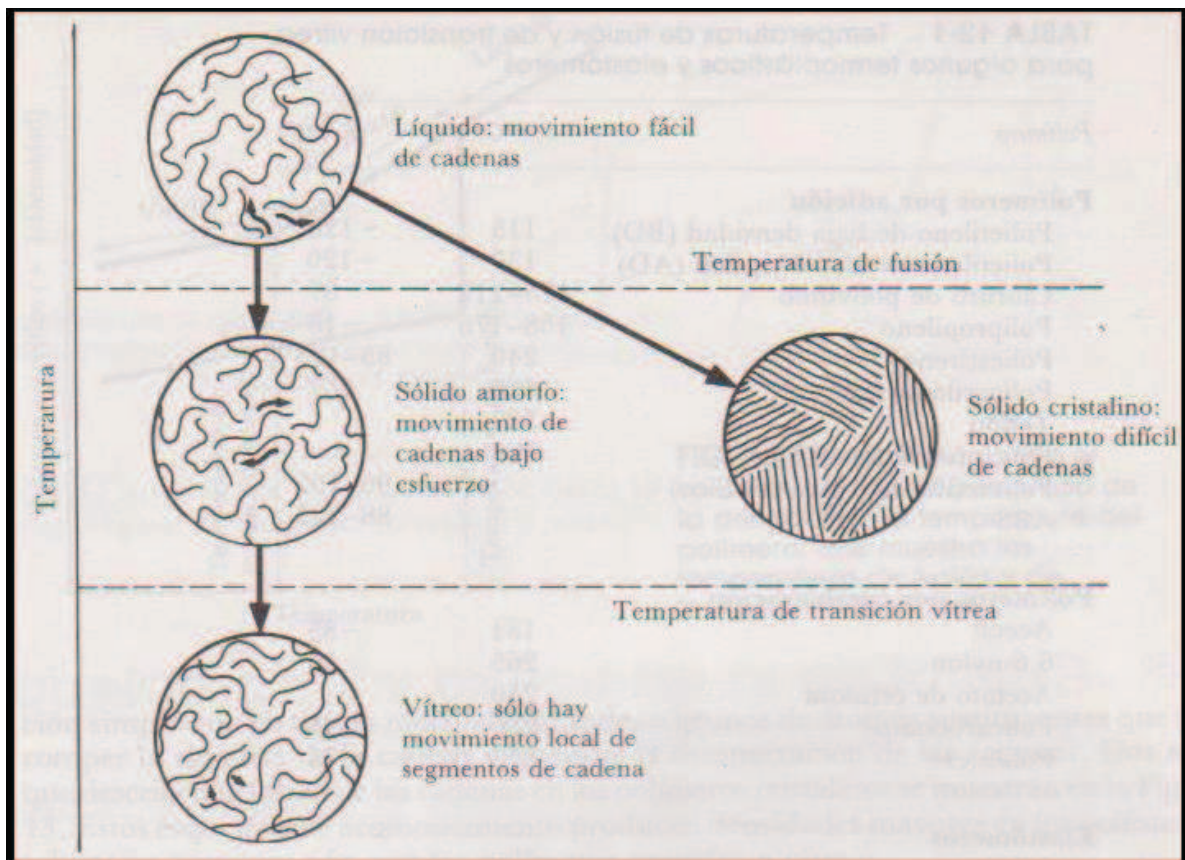


Figura 1.5 Efecto de la temperatura en la estructura y comportamiento de los polímeros termoplásticos
(Askeland, 1985, p. 339)

Con la disminución de la temperatura, disminuye también el movimiento de las cadenas llegando a un punto en que ya no se produce movimiento. Al llegar a la temperatura de transición vítrea que se indica en la Figura 1.5, el polímero adquiere comportamiento de vidrio cerámico y sus propiedades principales son la dureza y fragilidad (Askeland, 1985, p. 340).

La temperatura de transición vítrea comúnmente se presenta en valores entre 0,50 y 0,75 veces la temperatura de fusión del polímero. Para aplicaciones los polímeros se seleccionan con temperaturas de transición vítrea inferior a la temperatura requerida para el servicio (Askeland, 1985, p. 340).

1.3.2. POLIETILENO

El polietileno es un polímero termoplástico formado mediante el mecanismo de adición a partir de la unión de varias moléculas de etileno (Askeland, 1985, p. 343).

1.3.2.1. Clasificación de polietileno

El polietileno se clasifica según su densidad en polietileno de baja o de alta densidad, los valores en los que se presenta esta propiedad para cada tipo de polietileno se muestran la Tabla 1.6 (Seymour y Carraher, 1995, p. 24).

Tabla 1.6 Clasificación de polietileno por densidad

| Tipo de polietileno | Densidad (g/ml) |
|------------------------------|------------------------|
| Polietileno de baja densidad | 0,92-0,94 |
| Polietileno de alta densidad | 0,95 |

(Seymour y Carraher, 1995, p. 24)

El polietileno de baja densidad es un polímero ramificado de baja cristalinidad. Estas condiciones influyen para determinar propiedades como su baja rigidez y resistencia en comparación con polietileno de alta densidad, así como también la menor temperatura de fusión. Sus aplicaciones incluyen material laminado y recubrimiento para cables. El polietileno de alta densidad posee una estructura lineal, su porcentaje de cristalización es mayor. Su campo de aplicación principalmente es la fabricación de botellas, tubos, y artículos domésticos (Groover, 1997, p. 202).

1.3.2.2. Propiedades del polietileno

El polietileno es un material que posee buenas propiedades de tenacidad y flexibilidad en un amplio rango de temperaturas. Su densidad y viscosidad

disminuyen con el aumento de la temperatura. Debido a su relativamente bajo punto de fusión que se muestra en la Tabla 1.7, sus aplicaciones se ven limitadas a condiciones de baja temperatura por lo que sus aplicaciones industriales se limitan (Askeland, 1985, p. 340; Billmeyer, 1975, p. 388).

Tabla 1.7 Temperatura de transición vítrea y fusión de polietileno

| Tipo de polietileno | Temperatura °C | |
|------------------------------|-------------------|--------|
| | Transición Vítrea | Fusión |
| Polietileno de baja densidad | -100 | 115 |
| Polietileno de alta densidad | -115 | 135 |

(Groover, 1997, p. 202)

En cuanto a sus propiedades químicas, el polietileno es un material inerte. Su solubilidad es compleja y difícilmente puede disolverse a temperatura ambiente, la combinación de la aplicación de solvente y aumento de temperatura permite su disolución. Tiene alta resistencia ante ataques ácidos y alcalinos, con excepción del ácido nítrico que lo carboniza. El polietileno sufre deterioro bajo exposición prolongada la radiación ultravioleta y en atmósfera oxidante, produciéndose pérdidas de resistencia en sus propiedades El polietileno se utiliza para la fabricación de láminas debido a la combinación de propiedades como su baja densidad, flexibilidad sin necesidad de plastificantes, resistencia al desgarro, la humedad y su poca reactividad química (Billmeyer, 1975, p. 390).

1.3.3. SOLUBILIDAD DE POLIETILENO

La solubilidad del polietileno es una etapa de gran importancia en el desarrollo y diseño de procesos industriales de separación como fraccionamiento, cristalización y disolución. En la industria de polímeros se presenta deposición de polietileno en equipos y tuberías por lo tanto se ha requerido de estudios acerca de solventes que

puedan disolver estos residuos (Agarwal, Prasad, Maity, Gayen y Ganguli, 2004, p. 1427).

Los residuos de polietileno desechados como basura pueden recuperarse mediante un tratamiento con solvente, de esta manera se puede descomponer el polímero generando una fuente de materia prima para ser procesados nuevamente en plantas petroquímicas (Cadena, 2000, p. 57).

Además de la importancia a nivel industrial de la solubilidad del polietileno, existe otro campo de aplicación de esta técnica de separación. Las características de solubilidad de los polímeros, y del polietileno en particular, permiten su identificación. Otras propiedades utilizadas para el reconocimiento de materiales poliméricos son la densidad, ablandamiento y fusión (Bermudez, 1990, p. 37).

La solubilidad de una sustancia en un sistema no acuoso depende de dos factores. El primer factor que influye en la solubilidad es el punto de fusión y el calor de fusión del soluto. El segundo factor que afecta en el proceso de solución es la afinidad química entre las moléculas de soluto y de disolvente. En una solución ideal las moléculas de soluto y de disolvente se atraen con la misma fuerza entre si y entre sus opuestas (Bailey, 1984, p. 78).

El polietileno presenta una solubilidad muy baja a temperatura ambiente. La aplicación de un solvente en frío únicamente genera que el polímero se hinche sin obtener la disolución del material. Los solventes utilizados para atacar al polietileno generalmente son hidrocarburos aromáticos entre los cuales se encuentran xileno, tricloro benceno. La efectividad de la aplicación de los solventes en la solubilidad del polietileno requiere de aumento de temperatura (Bermudez, 1990, p. 36).

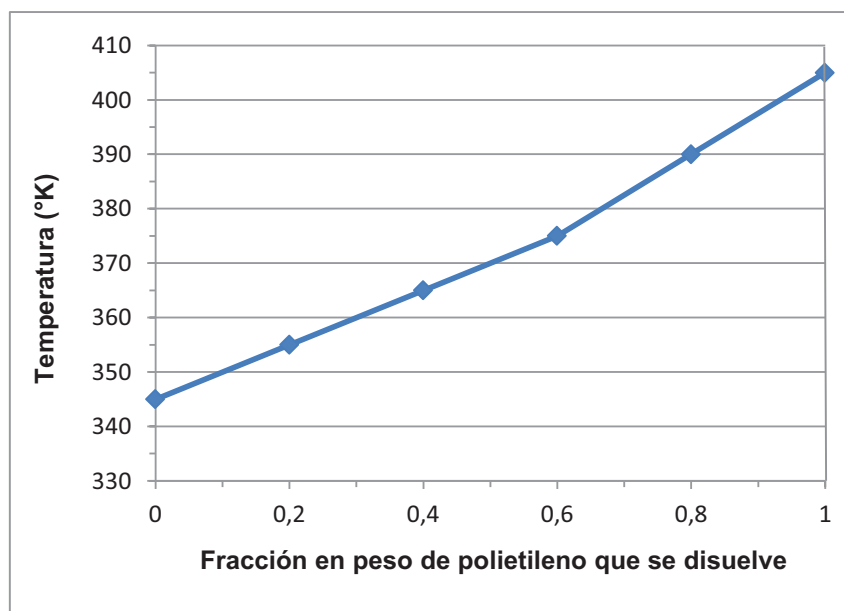
El comportamiento de algunos polímeros frente a diferentes solventes se presenta en la Tabla 1.8.

Tabla 1.8 Resumen de solubilidad de algunos polímeros

| Polímeros | Compuestos en los que se disuelve | Compuestos en los que no se disuelve |
|-----------------------------|--|--------------------------------------|
| polietileno, polibutano | Xileno, Tricloro benceno | acetona, dietileter, alcoholes bajos |
| polipropileno isotáctico | Decano y Decalina | |
| polipropileno atáctico | Hidrocarburos, Isoamilcetato | etilacetato, propanol |
| Poliisobutileno | Hexano, Benceno, Tetracloruro de carbono, Tetrahidrofurano | acetona, metanol, metilacetato |
| polibutadieno, poliisopreno | Hidrocarburos alifáticos y aromáticos | acetona, dietileter, alcoholes bajos |
| Poliestireno | Benceno, Tolueno, Cloroformo | acetona, dietileter, alcoholes bajos |
| Polivinilcloruro | Tetrahidrofurano, Ciclohexano | metanol-acetona, heptano |

(Bermudez, 1990, p. 45)

Agarwal et al (2004) realizó un modelo de la solubilidad de polietileno en xileno como solvente (p. 1427). La Figura 1.6 presenta un modelo de solubilidad de polietileno de baja densidad en xileno como solvente.

**Figura 1.6** Modelo de solubilidad de polietileno en xileno

(Agarwal et al, 2004, p. 1431)

1.3.4. SOLVENTES

Los solventes orgánicos son sustancias volátiles que presentan heterogeneidad química, su origen es industrial, comúnmente provenientes de la refinación de petróleo. Tienen como característica la capacidad de disolver gran cantidad de sustancias (Richard, 2003, p. 54).

1.3.4.1. Xileno

El xileno es un material sintético producido a partir del petróleo. Se utiliza principalmente como disolvente en la industria del caucho, del cuero y de pinturas. También tiene menor aplicación en la industria del plástico y de fibras sintéticas. El xileno es una sustancia inflamable que se evapora fácilmente. Es inmisible con el agua y presenta cierta afinidad con el etanol (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades-EEUU, 2007, p. 2).

La hoja de seguridad del xileno se presenta en el Anexo I.

1.3.4.2. Tricloro benceno

El tricloro benceno se utiliza como disolvente o producto intermedio en la fabricación de otros productos químicos. Existen tres isómeros de igual fórmula y peso molecular pero con distintas propiedades. El isómero de tricloro benceno que se presenta en estado líquido es el 1,2,4.tricloro benceno. Este compuesto es el de mayor fabricación de entre los isómeros de ticloro benceno (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades-EEUU, 2010, p. 2).

La hoja de seguridad del tricloro benceno se presenta en el Anexo I.

1.4. PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO

El proceso de fundición de aluminio, también conocido metalurgia secundaria, es el principal método de reciclaje de este material. La recuperación se realiza a partir de limallas y escorias generadas en la industria de procesamiento de aluminio (Totten y Mackenzie, 2003, p. 118).

Aunque la fundición de aluminio es un proceso térmico, no se debe realizar a temperaturas demasiado elevadas ya que esto perjudica la obtención del metal. Del mismo modo el tiempo es un factor que tiene que tomarse en cuenta ya que la permanencia del metal en estado de fusión por demasiado tiempo también resulta perjudicial para el producto final de la fundición (Aspin, 1995, p. 80)

Las principales características del aluminio son su baja densidad, alta conductividad térmica y eléctrica, y gran resistencia a la corrosión. Todas estas características contribuyen a determinar al aluminio como un material de ingeniería de gran aplicación (DeGarmo, Black y Kohser, 1994, p. 223).

La Tabla 1.9 muestra las principales propiedades físicas del aluminio y del óxido de aluminio.

Tabla 1.9 Propiedades físicas del aluminio y óxido de aluminio

| Propiedad | Al | Al₂O₃ |
|--------------------------------|-----------|------------------------------------|
| Peso atómico (g/mol) | 26,9 | 101,9 |
| Densidad a 20°C (g/ml) | 2,7 | 3,9 |
| Temperatura de fusión (°C) | 660 | 2 072 |
| Temperatura de ebullición (°C) | 2494 | 2 980 |

(Totten y Mackenzie, 2003, p. 116)

El aluminio tiene una gran variedad de aplicaciones como la fabricación de piezas para maquinaria, electricidad, construcciones civiles, la industria del transporte y la fabricación de envases para alimentos (Totten y Mackenzie, 2003, p. 117).

1.4.1. ALUMINIO SECUNDARIO

El aluminio secundario es el aluminio que se obtiene del procesamiento de chatarra y de la escoria resultante de la fundición aluminio durante el proceso de moldeo de piezas (Totten y Mackenzie, 2003, p. 116).

La metalurgia secundaria de aluminio se puede dividir en dos procesos de acuerdo al tipo de material que se utilice como materia prima, la fundición de limallas y la fundición de material escorificado proveniente de otros procesos (Totten y Mackenzie, 2003, p. 118).

El proceso de metalurgia secundaria permite el reciclaje de gran cantidad de material de desechos que contienen aluminio. Este método de recuperación permite ahorrar energía ya que la fundición de las limallas y escorias es un proceso menos costoso que la producción de aluminio primario a partir de la bauxita (Totten y Mackenzie, 2003, p. 118).

Durante la fundición de limallas y escorias es factible la absorción de pequeñas cantidad de impurezas, por lo tanto se produce un material conocido como aluminio metalúrgico de menor calidad que el obtenido por electrólisis que se conoce como aluminio purísimo (Hufnagel, 1992, p. 5).

1.4.2. PROBLEMAS EN LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO

Durante el proceso de fundición de aluminio se produce una capa de escoria. La principal causa para la formación de escoria es la elevada reactividad que tiene el aluminio al ponerse en contacto con el oxígeno, favoreciendo la formación de una lámina de óxido de aluminio que se deposita en la superficie del metal fundido (DeGarmo et al, 1994, p. 223; Totten y Mackenzie, 2003, p. 118).

Además de la afinidad del aluminio puro con el oxígeno, existe otra reacción química que produce óxido durante la fundición. La tendencia del aluminio a absorber hidrógeno favorece la oxidación superficial del metal fundido (Gallo, 2002, p. 8).

Las reacciones que se producen en la superficie del aluminio fundido y que producen su oxidación se presentan en la Ecuación 1.1 y Ecuación 1.2



La capa de óxido superficial que recubre la superficie del aluminio, se convierte en una barrera física adherente y compacta que protege el material fundido de la atmósfera oxidante. Al final de la fundición esta capa de óxido es retirada dejando como producto aluminio puro, y un residuo de escoria que contiene parte del aluminio que se retira junto con la escoria (DeGarmo et al, 1994, p. 223; Totten y Mackenzie, 2003, p. 118).

La escoria producida en la fundición de aluminio está compuesta por óxidos, aluminio metálico, e impurezas que se encuentran en la superficie del metal fundido (Totten y Mackenzie, 2003, p. 120).

La formación de la lámina de óxido de aluminio es un fenómeno superficial característico del proceso de fundición de aluminio. Debido a que se trata de una reacción de oxidación en la superficie del metal, el grosor del material que se procesa influye en la cantidad de óxido que se genera. Por lo tanto la fundición de materiales delgados aumenta la oxidación porque se incrementa la relación entre la superficie del material y su volumen (Gallo, 2002, p. 8; Totten y Mackenzie, 2003, p. 119).

El óxido de aluminio es un compuesto muy estable, y muy difícilmente puede ser reducido a aluminio mediante fundición en condiciones normales. Por lo tanto es de

gran importancia disminuir la cantidad de óxido de aluminio que se genera durante la fundición. La generación de escoria es un proceso que no se puede evitar en la fundición de aluminio, y es la mayor pérdida de aluminio durante la fusión. Para reducir la formación de escoria se puede utilizar técnicas de fundición que incluyen el cambio de hornos y la utilización de cargas fundentes. La cantidad de escoria en un proceso de fundición se encuentra en el rango entre 5 a 10 % del peso del material fundido (Gallo, 2002, p. 8).

1.4.2.1. Fundición de chatarra

La fundición de chatarra se puede realizar en hornos rotatorios, y en pequeña escala en hornos de crisol y de reverbero. Por tratarse de residuos muchas veces de poco grosor es necesario evitar la oxidación del material, para esto se añade sales fundentes. La cantidad de sales fundentes que se añade en la fundición de chatarra no es mayor al 2 %, aunque este valor puede aumentar si se trata de chatarra de poco o que contenga residuos orgánicos como envases de bebidas y láminas de aluminio de poco grosor (Totten y Mackenzie, 2003, p. 123).

La chatarra de aluminio dependiendo de su precedencia puede contener diferentes impurezas que se muestran en la Tabla 1.10.

Tabla 1.10 Fuentes de chatarra de aluminio y sus impurezas

| Chatarra | Impurezas |
|--------------------|---------------------------------------|
| Cables | Fe, Zn, Cu, y material orgánico |
| Piezas de aluminio | Fe, Cu |
| Láminas guresas | Fe, óxidos |
| Papel aluminio | aceites, residuos de alimentos, papel |
| Tubos | Fe, tintas, plásticos |
| Radiadores | Fe, Sn, Pb |
| Envases de bebidas | Fe, Cu, Mg, tintas. |

(Totten y Mackenzie, 2003, p. 124)

El rango de temperatura en la que se realiza el proceso de fundición de aluminio es de 700 a 800°C, Este mismo rango de temperatura se utiliza para la recuperación de chatarra de aluminio (Totten y Mackenzie, 2003, p. 123)

1.4.2.2. Fundición de escoria

Durante la fundición del aluminio se produce cierta cantidad de material que se compone por óxido de aluminio e impurezas. Este material se deposita en la superficie del aluminio fundido y se conoce como escoria (Gallo, 2002, p. 8).

La escoria puede clasificarse en dos clases, escoria blanca y escoria negra. La escoria blanca es la que proviene de la metalurgia primaria y se caracteriza por contener mayor cantidad de aluminio entre 15 a 70 % de material metálico, y por la ausencia de sales fundentes. La escoria negra es la que se produce durante la fundición de aluminio secundario, contienen de 1 a 7 % de aluminio metálico y en su composición se encuentran residuos de sales fundentes añadidos durante el proceso de fundición (Totten y Mackenzie, 2003, p. 124).

1.4.3. FUNDICIÓN CON SALES FUNDENTES

En el reciclaje de aluminio mediante la fundición de escoria y chatarra de poco grosor tiene que evitarse la oxidación del material. Este proceso debe realizarse bajo condiciones especiales para disminuir el contacto del metal fundido con el oxígeno (Gallo, 2002, p. 10; Totten y Mackenzie, 2003, p. 125).

Una de las maneras de evitar la formación de óxido de aluminio es agregar durante la fundición una carga de sales fundentes (Gallo, 2002, p. 10; Totten y Mackenzie, 2003, p. 125).

Sales fundentes

Las sales fundentes son compuestos químicos que se añaden en el proceso de fundición con el objetivo de obtener aluminio puro de mejor calidad (Gallo, 2002, p. 10).

Las principales funciones de estas sales son prevenir la excesiva formación de óxidos y remover cualquier residuo no metálico presente en el material fundido (Gallo, 2002, p. 10).

La carga fundente se agrega en el horno al inicio de la fundición y la cantidad de sales que se utiliza esta en el rango de 20 a 65 % de la carga de material (Totten y Mackenzie, 2003, p. 126).

Las características que debe cumplir un compuesto para ser utilizado como fundente son (Totten y Mackenzie, 2003, p. 126):

- Temperatura de fusión menor a 720°C
- Densidad menor a la del aluminio
- Fácil separación del material fundido
- Inerte frente al material fundido y sus impurezas
- No ser higroscópico
- Baja presión de vapor

En la Figura 1.7 se presenta en esquema del mecanismo de destrucción de la capa de óxido superficial mediante la adición de sales fundentes durante el proceso de fundición de aluminio.

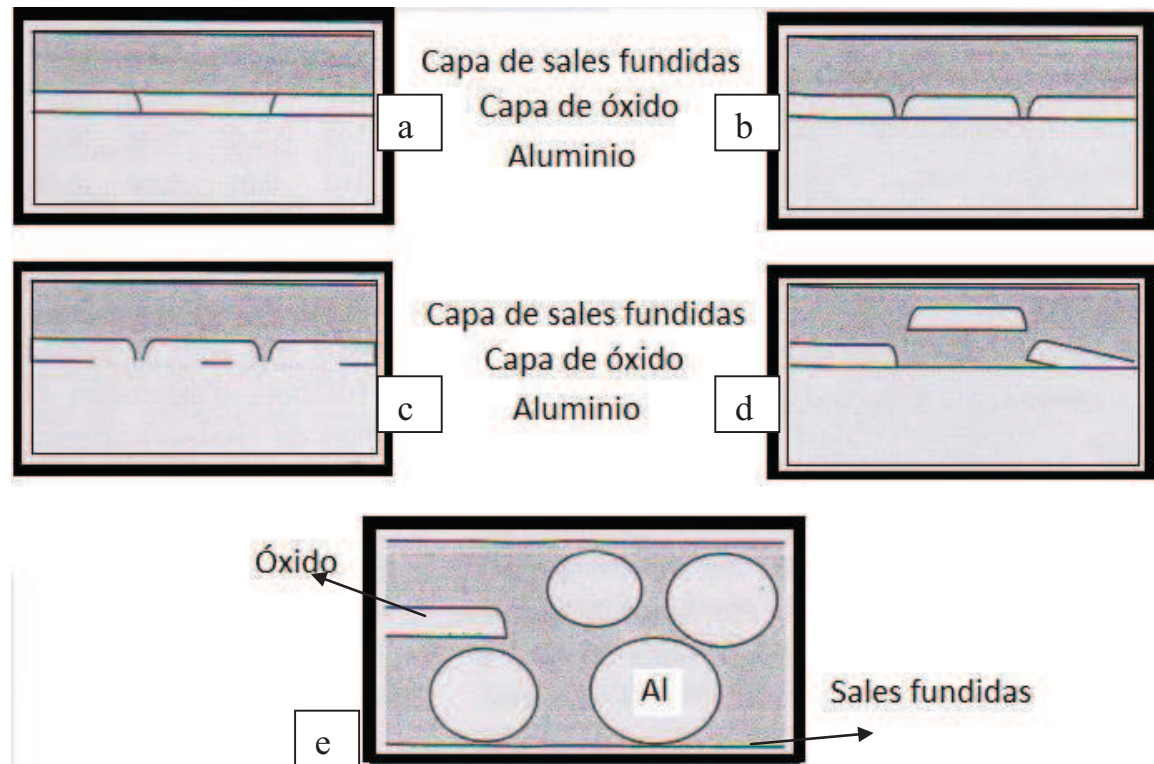


Figura 1.7 Mecanismo de destrucción de la capa superficial de óxido
(de la Torre et al, 2011, p.50)

En la Figura 1.7 se presenta el mecanismo de destrucción de la capa superficial de óxido durante la fundición en cinco etapas: contacto de las sales fundentes con la capa superficial de óxido (a), separación de porciones del óxido (b) difusión de la sal en la interfase del óxido y el metal (c), separación del óxido de la superficie del aluminio (d), formación de gotas de metálicas como resultado de la adición de sales fundentes en la fundición (d).

1.4.4. MEZCLAS DE SALES FUNDENTES

La carga fundente que se agrega en la fundición de aluminio está compuesta por dos o más sales. La principal composición que se utiliza como fundente es la mezcla equimolar de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl). Además se pueden

utilizar otros cloruros y fluoruros como criolita (Na_2AlF_6), fluoruro de sodio (NaF), fluoruro de potasio (KF), fluoruro de calcio (CaF_2), y fluoruro de magnesio (MgF_2) (Totten y Mackenzie, 2003, p. 128).

La temperatura de fusión de los cloruros se encuentra en el rango de 180 a 960°C. La mezcla de estos compuestos genera un punto eutéctico de menor temperatura de fusión por lo que toma importancia la concentración de cada compuesto en la mezcla de sales (Gallo, 2002, p. 10).

Existen diferentes composiciones para los fundentes y comercialmente se pueden encontrar de diferente tamaño de partícula, diferenciándose en dos tipos, fundente en polvo y fundente granular (Sibley, 1996, p.17).

1.4.4.1. Diagramas de fase de mezclas de sales fundentes

Los diagramas de fase son representaciones gráficas de las condiciones termodinámicas de equilibrio de un sistema compuesto por dos o más fases sólidas (Agudelo y Restrepo, 2005, p. 13).

Los diagramas de fase son de gran importancia ya que permiten predecir el comportamiento térmico de una mezcla de acuerdo a su composición, la formación de fases y la temperatura de transición de estado para cada concentración de los diferentes componentes (Abril, 1956, p. 61).

El diagrama de fase para la mezcla cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl) se presenta en la Figura 1.8.

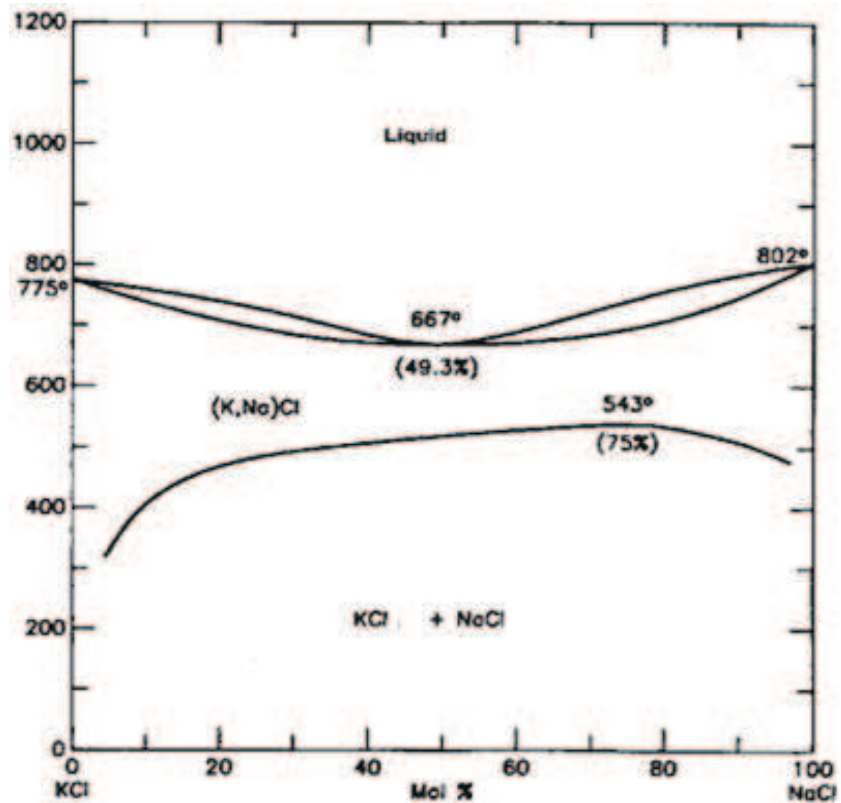


Figura 1.8 Diagrama de fase del sistema NaCl-KCl
(Totten y Mackenzie, 2003, p. 129)

De acuerdo al diagrama de fase presentado en la Figura 1.9, se puede determinar los datos de temperatura de fusión para los componentes puros. La temperatura de fusión de NaCl es 802°C y del KCl es 775°C, sin embargo la mezcla equimolar de estos componentes presenta un punto eutéctico con temperatura de fusión de 667°C. (Totten y Mackenzie, 2003, p. 129).

En el Anexo II se presentan varios diagramas de fase para mezclas binarias de cloruros y fluoruros

También existen diagramas de fase para sistemas sólidos de tres componentes. En la Figura 1.9 se muestra el diagrama para la mezcla de NaCl, KCl y NaF. En esta

representación se puede observar que la adición de NaF disminuye la temperatura de fusión de la mezcla binaria de cloruros (Totten y Mackenzie, 2003, p. 130).

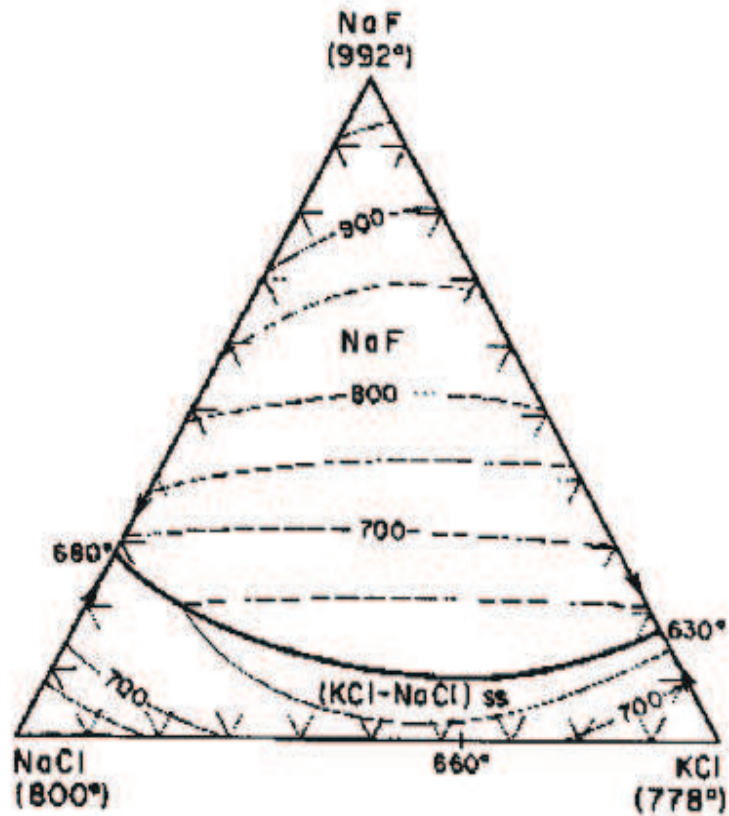


Figura 1.9 Diagrama de fase para el sistema NaCl-KCl-NaF
(Totten y Mackenzie, 2003, p. 130)

1.4.4.2. Tensión interfacial entre aluminio y sales fundentes

La adición de fluoruros a la mezcla binaria de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl) disminuye la tensión interfacial entre el aluminio y las sales fundidas. La eficiencia de los fluoruros se resume de acuerdo al siguiente orden:

- Fluoruro de potasio
- Fluoruro de sodio
- Fluoruro de magnesio

- Fluoruro de calcio
- Fluoruro de litio
- Criolita

El fluoruro con mejor efecto en la disminución de la tensión interfacial de la mezcla de sales fundente y aluminio es el fluoruro de potasio (KF), aunque en concentraciones mayores al 10 % molar, la adición de fluoruro de sodio (NaF) produce resultados similares (Totten y Mackenzie, 2003, p. 129).

1.4.4.3. Coalescencia del aluminio en sales fundentes

La coalescencia es la capacidad de formar gotas y en el caso de la fundición de aluminio esta propiedad está íntimamente relacionada con la capacidad de remover la capa superficial de óxido. La presencia de óxido de aluminio en porcentajes muy bajos dificultan el contacto de las gotas de aluminio, si la cantidad de óxido es mayor al 10 % la disminución de la coalescencia es considerable (Totten y Mackenzie, 2003, p. 130).

La adición de cloruros en la mezcla de sales fundentes no influye significativamente en la coalescencia. Los fluoruros si producen mejoría en el efecto sobre la capacidad de formar gotas de aluminio durante la fundición.

Las sales de flúor que producen mayor coalescencia en la mezcla fundente en menor tiempo son (Totten y Mackenzie, 2003, p. 132):

- Fluoruro de potasio
- Fluoruro de bario
- Fluoruro de aluminio
- Criolita

1.4.4.4. Interacción entre el óxido y las sales fundentes

Además de mejorar la coalescencia las sales de flúor también cumplen la función de solubilizar el óxido de aluminio, por lo tanto la adición de este tipo de sales a la carga fundente genera mejoría en el resultado final de la fundición (Totten y Mackenzie, 2003, p. 133).

La adición de pequeñas cantidades de fluoruro de potasio (KF) a la mezcla de de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl) aumenta la solubilidad de la capa de óxido. El fluoruro de potasio presenta resultados en la disolución de la alúmina desde la adición de 2,5 % (Totten y Mackenzie, 2003, p. 133).

1.4.4.5. Fundición de escoria y chatarra de aluminio en presencia de sales fundentes

Yépez (2010), realizó un estudio sobre la recuperación de aluminio de desechos industriales y electrónicos. Los desechos: escoria del proceso de fundición, limalla del proceso de extrusión, limalla del proceso de corte y disipadores de calor de computadoras (p. 214).

Para la fundición del material, Yépez (2010) analizó la influencia de diferentes tipos de sales fundentes y de parámetros como: temperatura, tiempo, agitación, porcentaje de sales fundentes con respecto a la carga inicial de aluminio y la composición de la carga fundente (p. 46).

En la Tabla 1.11 se presentan el resumen de las mejores condiciones para la fundición de escoria y chatarra de aluminio de acuerdo al estudio realizado por Yépez (2010).

Tabla 1.11 Condiciones de operación definidas para la fundición de desechos industriales y electrónicos de aluminio en presencia de sales fundentes

| Material | Temperatura (°C) | Carga de sales (%) | KCl (% mol) | NaCl (% mol) | Agitación | tiempo (min) | Recuperación (%) |
|----------------------------------|------------------|--------------------|-------------|--------------|-----------|--------------|------------------|
| Disipadores de calor | 850 | 100 | 90 | 10 | - | 60 | 97,6 |
| Limallas de extrusión | 850 | 50 | 70 | 30 | si | 20 | 98,5 |
| Limallas de corte | 850 | 100 | 100 | 0 | si | 30 | 93,6 |
| Escoria de fundición de chatarra | 750 | 50 | 50 | 50 | - | 120 | 71,6 |

(Yépez, 2010, p. 209)

En la Tabla 1.12 se muestra la recuperación de aluminio con la variación de la composición de la mezcla de sales fundentes.

Tabla 1.12 Recuperación de aluminio con la variación de la composición de la mezcla de sales fundentes para la fundición de limallas de corte de perfiles de aluminio

| Temperatura (°C) | | 700 | 750 | 800 | 850 |
|---------------------------|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Concentración KCl (% mol) | Concentración NaCl (% mol) | Recuperación (%) | Recuperación (%) | Recuperación (%) | Recuperación (%) |
| 100,0 | 0,0 | 0,0 | 40,0 | 75,2 | 79,2 |
| 90,0 | 10,0 | 66,8 | 70,4 | 76,8 | 82,0 |
| 80,0 | 20,0 | 77,2 | 76,8 | 8,0 | 81,2 |
| 70,0 | 30,0 | 79,2 | 78,8 | 78,8 | 80,4 |
| 60,0 | 40,0 | 81,6 | 80,0 | 79,6 | 79,6 |
| 50,0 | 50,0 | 83,2 | 81,6 | 80,8 | 79,2 |
| 40,0 | 60,0 | 80,8 | 79,2 | 79,2 | 78,4 |
| 30,0 | 70,0 | 77,6 | 76,8 | 78,8 | 78,0 |
| 20,0 | 80,0 | 72,8 | 74,0 | 77,2 | 76,8 |
| 10,0 | 90,0 | 65,6 | 67,6 | 73,2 | 76,0 |
| 0,0 | 100,0 | 0,0 | 33,6 | 72,4 | 74,4 |

(Yépez, 2010, p. 156)

La Tabla 1.13 presenta resultados de recuperación de aluminio con la variación del porcentaje de carga fundente con respecto a la carga de materia prima.

Tabla 1.13 Recuperación de aluminio con la variación del porcentaje de sales fundentes para la fundición de limallas de corte de perfiles de aluminio.

| Temperatura (°C) | 700 | 750 | 800 | 850 |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Carga de mezcla de sales respecto a la cantidad de materia prima (%) | Recuperación (%) | Recuperación (%) | Recuperación (%) | Recuperación (%) |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10,0 | 50,4 | 50,0 | 54,4 | 52,8 |
| 20,0 | 74,4 | 71,2 | 70,0 | 71,2 |
| 30,0 | 80,8 | 78,0 | 77,6 | 78,4 |
| 40,0 | 83,2 | 81,6 | 80,8 | 82,0 |
| 50,0 | 82,8 | 82,8 | 78,8 | 80,8 |
| 60,0 | 82,4 | 81,2 | 78,0 | 79,2 |
| 70,0 | 81,6 | 80,4 | 77,6 | 78,4 |
| 80,0 | 81,2 | 79,6 | 76,8 | 77,2 |
| 90,0 | 79,6 | 78,4 | 75,6 | 76,4 |
| 100,0 | 78,8 | 33,6 | 74,8 | 74,0 |

(Yépez, 2010, p. 159)

En la Tabla 1.14 se presentan los resultados de tiempo de fundición para limallas de corte de perfiles de aluminio.

Tabla 1.14 Recuperación de aluminio con la variación de tiempo de fundición para limallas de corte de perfiles de aluminio

| Temperatura (°C) | 700 | 750 | 800 | 850 |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tiempo (min) | Recuperación (%) | Recuperación (%) | Recuperación (%) | Recuperación (%) |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 15,0 | 46,8 | 41,6 | 40,8 | 41,6 |
| 30,0 | 68,4 | 66,8 | 68,0 | 64,4 |
| 45,0 | 77,6 | 74,8 | 74,8 | 75,2 |
| 60,0 | 81,3 | 79,2 | 78,0 | 80,8 |
| 90,0 | 83,0 | 81,6 | 79,6 | 81,6 |
| 120,0 | 83,2 | 82,8 | 80,8 | 82,0 |
| 150,0 | 81,6 | 80,8 | 79,6 | 80,0 |
| 180,0 | 79,2 | 78,8 | 79,2 | 78,4 |

(Yépez, 2010, p. 162)

La Tabla 1.15 presenta la influencia de la agitación en la fundición de limallas de corte de perfiles de aluminio.

Tabla 1.15 Análisis de la influencia de la agitación en el tiempo de fundición de limallas corte de perfiles de aluminio a 850°C

| Tiempo de fusión (min) | Sin agitación | Con Agitación |
|------------------------|------------------|------------------|
| | Recuperación (%) | Recuperación (%) |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 15,0 | 41,6 | 83,2 |
| 30,0 | 64,4 | 93,6 |
| 45,0 | 75,2 | 88,8 |
| 60,0 | 80,8 | 83,6 |

(Yépez, 2010, p. 181)

En la Figura 1.10 se presenta resultados de la adición de fluoruro de sodio en la fundición de residuos industriales y electrónicos.

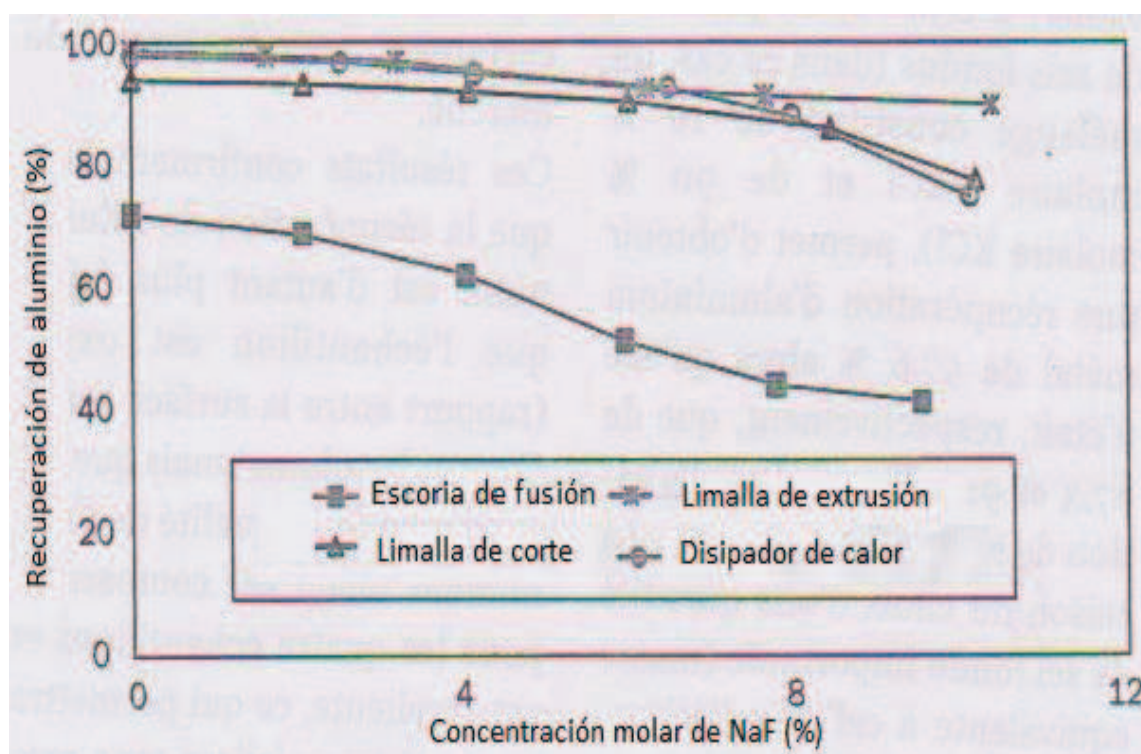


Figura 1.10 Influencia de la adición de fluoruro de sodio en la fundición de residuos industriales y electrónicos
(de la Torre et al, 2011, p. 55)

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se desarrolló el diseño de una planta para recuperación de aluminio de envases multicapa mediante procesos de lixiviación con solventes orgánicos y de fundición en presencia de sales fundentes.

Para la realización de los ensayos fue necesaria la recolección de materia prima, la cual se compone de envases multicapa post consumo.

La recolección se realizó durante dos meses en hogares de Quito, llegando a obtener aproximadamente 8,5 kg de material. Esta materia prima requirió de un primer proceso de lavado para poder almacenarla.

Una vez que se obtuvo un stock de materia prima, se procedió a realizar ensayos con el objetivo de separar las diferentes capas que componen a los envases y obtener una lámina de aluminio. Para la separación se utilizó varios tipos de solventes en dos etapas:

- Tratamiento de los envases mediante agitación con agua
- Tratamiento para disolver las láminas de polietileno mediante lixiviación con xileno y tricloro benceno.

Una vez que se obtuvieron láminas de aluminio libre de polietileno del proceso de lixiviación, estas fueron compactadas para el proceso de fundición.

La fundición de las láminas de aluminio se realizó con parámetros constantes (tipo de horno, composición de la carga fundente, cantidad de aluminio inicial), y variables (temperatura, tiempo, porcentaje de carga fundente con respecto al material inicial, adición de fluoruro de sodio) que permitieron determinar las mejores condiciones para obtener aluminio como producto.

En la Figura 2.1 se presenta un esquema de la metodología experimental utilizada para la separación de las láminas de los envases multicapa.

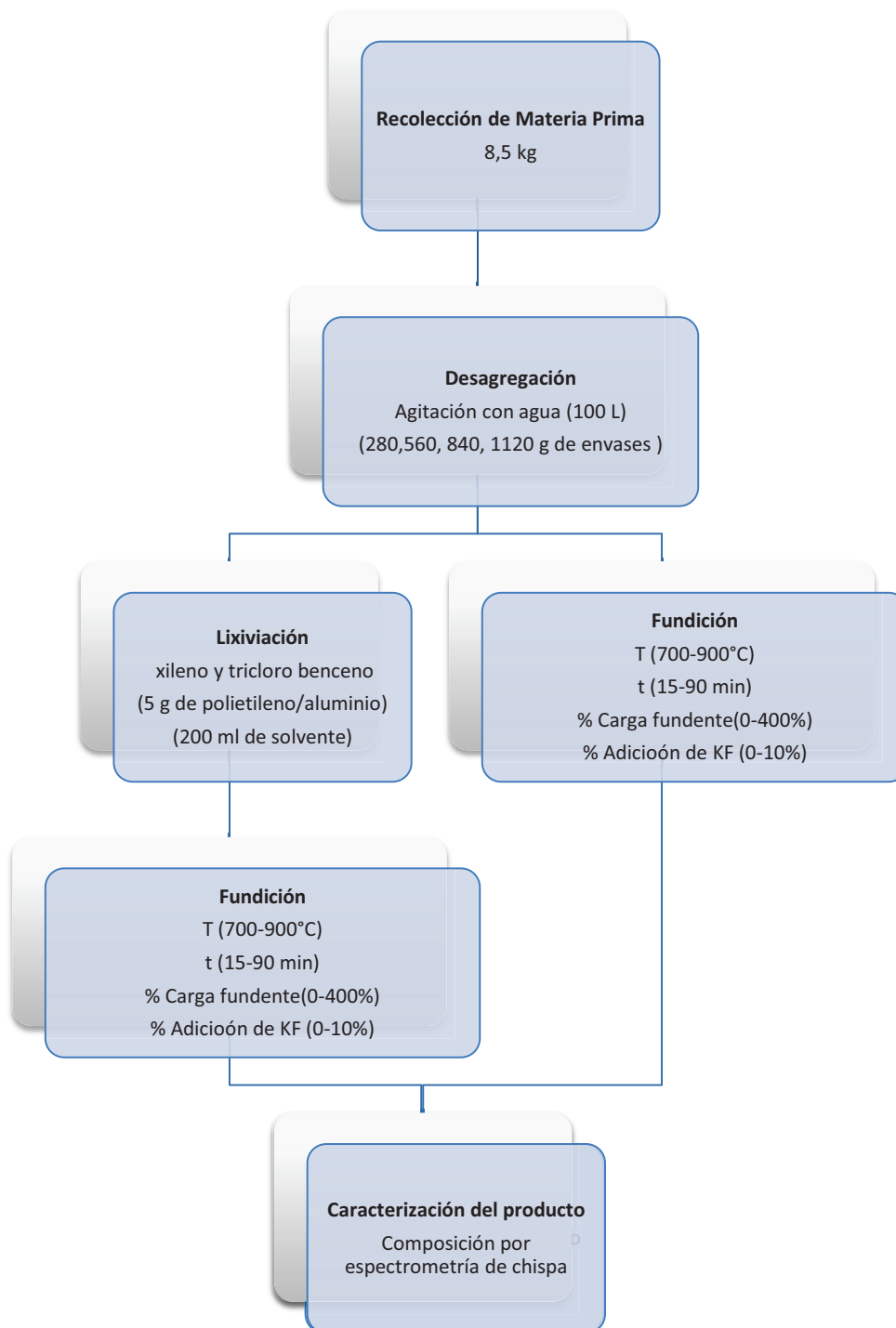


Figura 2.1 Esquema de la metodología experimental

2.1. ENSAYOS DE SEPARACIÓN DE LA LÁMINA DE CARTÓN Y LA PRIMERA LÁMINA DE POLIETILENO MEDIANTE AGITACIÓN CON AGUA.

El material fue lavado previamente con agua potable, para evitar la descomposición de cualquier tipo de residuo biológico que pueda existir, ya que se trataba de envases post consumo de: jugos, lácteos y avenas.

Este proceso se realizó para desprender el cartón y la lámina de polietileno externa que lo recubre. Estas capas constituyen las dos primeras etapas de un envase multicapa.

En la Figura 2.2 se muestra los envases multicapa que constituyen la materia prima del proceso.



Figura 2.2 Envases multicapa previamente lavados

2.1.1. DESAGREGACIÓN DE ENVASES MULTICAPA

El proceso de desagregación de los envases multicapa se realizó en un tanque agitado marca Quinn Process Equipment, con capacidad de 180 L, con un agitador con 2 hp de potencia. El equipo se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Tanque para agitación

Los parámetros constantes fueron: la potencia de agitación 2 hp y el volumen de agua 100 L. Las condiciones variables fueron la cantidad de envases (280, 560, 840, 1120 g) y el tiempo de operación del tanque desagregador (10, 20, 30, 40, 50, 60 min). El rango de tiempo estudiado se determinó con base en experimentación previa.

Una vez que se ha desprendido el cartón de los envases multicapa, el material compuesto de aluminio/polietileno fue retirado de la agitación para evitar que por efecto de la desagregación, las capas se destruyan. La separación de las láminas se realizó de manera manual al final de cada tiempo evaluado.

La agitación de los envases multicapa se presenta en la Figura 2.4



Figura 2.4 Agitación de envases multicapa

2.1.2. SECADO DE LÁMINAS DE ALUMINIO/POLIETILENO

El secado de las láminas de aluminio/polietileno se lo efectuó a temperatura ambiente aproximadamente 20°C por un periodo de 4 horas.

Este procedimiento se lo realizó para preparar el material para la lixiviación con solventes. Para el tratamiento con xileno y tricloro benceno es necesario que no exista agua remanente en el material.

El proceso de secado de láminas se presenta en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Secado de láminas de aluminio/polietileno

2.2. ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO CON XILENO, TRICLORO BENCENO PUROS Y EN SOLUCIÓN CON ETANOL 50 %

Para los ensayos de lixiviación de polietileno con solventes se utilizó un equipo de extracción soxhlet de 6 dispositivos con capacidad de 250 ml de solvente. Se evaluó la utilización de xileno (98 % pureza) y tricloro benceno (98 % pureza) y en solución con etanol al 50 % para disolver el polietileno contenido en el material y obtener láminas de aluminio

Los parámetros de operación que se mantuvieron constantes fueron la cantidad de solvente (200 ml), la cantidad de material (5 g) y la temperatura (138°C para el xileno y 213°C para el tricloro benceno), la cual corresponde a la temperatura de ebullición

de cada solvente respectivamente. La condición variable que se evaluó fue el tiempo de lixiviación.

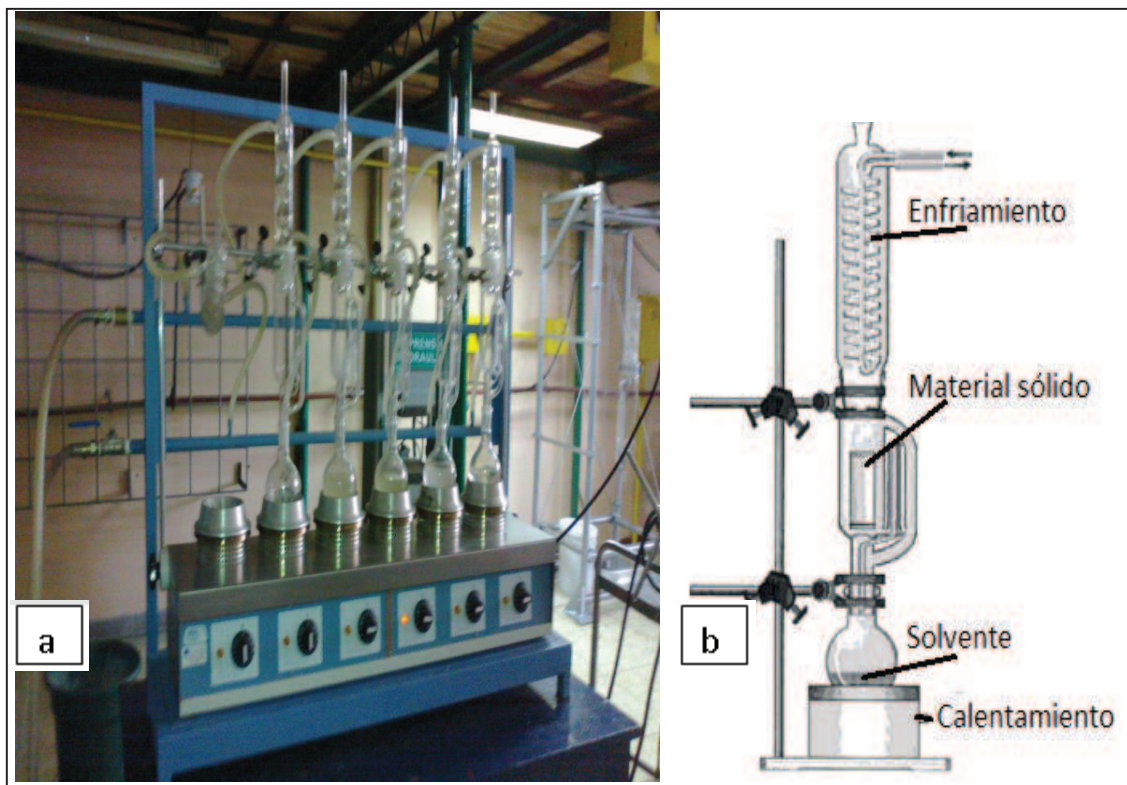


Figura 2.6 a) Equipo de extracción soxhlet, b) Esquema del equipo
(Sanz, Raigon, Llores y Llopis, 2002, p. 49)

El procedimiento de lixiviación de polietileno con solventes se realizó siguiendo los siguientes pasos:

- Se pesaron 5 g de material constituido por láminas de aluminio/polietileno.
- Las láminas se introdujeron en cartuchos de celulosa, porque retiene al sólido y permite la circulación de solvente.

En la Figura 2.7 se presentan los cartuchos de celulosa con láminas de polietileno/aluminio en su interior.



Figura 2.7 Láminas de polietileno/aluminio dentro del cartucho de celulosa

- Se colocó el cartucho de celulosa en el equipo de extracción, en la parte superior correspondiente a la etapa de condensación del solvente.
- El balón de destilación se llenó con 200 ml de solvente (xileno 98 % de pureza, tricloro benceno 98 % de pureza y mezclas con etanol al 50 %).
- Se armó el equipo de extracción. En la Figura 2.8 se muestra el equipo de extracción soxhlet armado.
- La temperatura se elevó hasta la ebullición de los solventes (138 y 213°C respectivamente para xileno y tricloro benceno).
- La extracción se realizó durante periodos de tiempo variables (30, 60,90, 120, 180 min).



Figura 2.8 Equipo de extracción soxhlet armado

- Luego de finalizado el tiempo de extracción se dejó enfriar el equipo para poder sacar el aluminio y evitar pérdida de solvente por evaporación.
- Las láminas de aluminio resultantes del proceso se lavaron manualmente con 1L de etanol para limpiar de solvente y de polietileno que pudo adherirse durante el enfriamiento.

2.2.1. ANÁLISIS QUÍMICO DE LÁMINAS DE ALUMINIO

Las láminas metálicas obtenidas del proceso de lixiviación fueron analizadas para conocer la composición inicial previa al proceso de fundición. El análisis se realizó mediante espectrofotometría de chispa en el equipo Bruker Q4 TASMÁN del laboratorio de análisis del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional. La preparación de la muestra consistió en la compactación de una lámina de aluminio.

2.2.2. RECUPERACIÓN DE SOLVENTE

Luego de concluido el proceso de lixiviación, el solvente utilizado se contaminó con el polietileno extraído. Este residuo de la separación fue almacenado para su posterior tratamiento y recuperación. El solvente contaminado fue destilado en el mismo equipo de extracción soxhlet para separar el polietileno y poder reutilizar el disolvente en nuevos ensayos. Se procedió a calentar la mezcla de solvente y polietileno para separarlos debido a sus diferentes temperaturas de ebullición.

2.3. ENSAYOS DE FUNDICIÓN DE LAS LÁMINAS DE ALUMINIO CON CLORURO DE SODIO, CLORURO DE POTASIO Y FLUORURO DE POTASIO.

Los ensayos de fundición de las láminas de aluminio se realizaron en un horno eléctrico (0,064 m³ de capacidad). Las láminas fueron compactadas mediante prensa hidráulica (400kg/cm²) y luego colocadas en crisoles de barro. En la Figura 2.9 se presenta el horno eléctrico utilizado para la fundición del aluminio y un esquema de sus dimensiones.

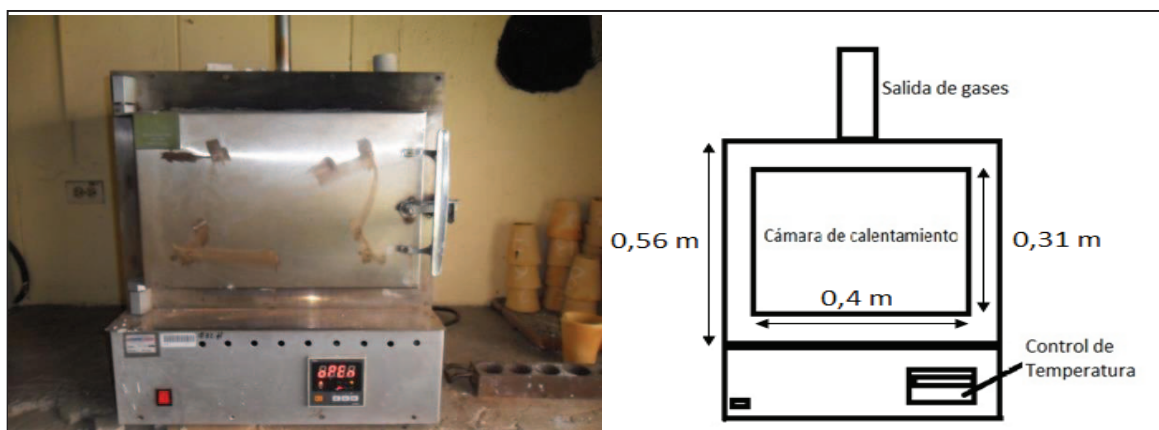


Figura 2.9 Mufla eléctrica marca

Las condiciones iniciales con las que se trabajó para realizar la variación de parámetros fueron establecidas sobre la base de experimentación previa, la cual permitió conocer condiciones en las que se tiene menor oxidación de la fase metálica. La fundición se efectuó con diferentes parámetros de operación variando: temperatura (700 a 900°C), tiempo de fusión (15 a 909 min), cantidad de sales fundentes (0 a 200 % de la carga inicial de materia prima), adición de fluoruro de potasio (5-10 %).

Las sales fundentes que se utilizaron para mejorar la fundición fueron compuestas por mezcla de sales principalmente de cloro, que permiten el recubrimiento de la fase metálica, también se utilizó fluoruro de potasio para disminuir la tensión interfacial entre el aluminio y las sales (Totten y Mackenzie, 2003, p. 128)

Para el proceso de fundición de las láminas de aluminio se realizó el siguiente procedimiento para preparar las muestras.

- Se compactaron las láminas de aluminio mediante prensa hidráulica
- Se pesaron 2 g de laminas de aluminio compactadas
- Las láminas compactadas fueron colocadas en crisoles de barro. En la Figura 2.10 se muestra las láminas de aluminio en el interior del crisol.



Figura 2.10 Láminas de aluminio compactadas dentro de crisol

- Se preparó la mezcla de carga fundente con 50 % de KCl y 50 % de NaCl en masa. Para los ensayos de adición de fluoruro de potasio, se adicionó KF (5 a 10 %). Se homogenizó para mejorar ayudar el proceso de mezcla.
- Se añadió la mezcla de sales fundentes al crisol. En la Figura 2.11 se presenta el recubrimiento de sales dentro del crisol.



Figura 2.11 Crisol listo para fundición

- Se introdujo el crisol en la mufla bajo las diferentes condiciones de temperatura y tiempo de acuerdo al detalle de la sección 2.3.1 y 2.3.2.
- Al final se dejó enfriar y se recuperó la fase metálica.
- Se pesó el producto final.

2.3.1. ENSAYOS DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA

Se realizaron ensayos de variación de temperatura de fundición con el objetivo de determinar la influencia de esta condición en la oxidación de la fase metálica.

Para los ensayos de variación de temperatura se fijaron parámetros constantes de porcentaje de carga fundente con respecto a la cantidad inicial de aluminio, composición de las sales y tiempo de fundición

Se realizaron cinco ensayos a diferentes temperaturas. La variación de la temperatura se realizó para temperaturas de 700, 750, 800, 850 y 900°C.

Los parámetros constantes para los ensayos fueron:

- Masa inicial 2 g de láminas de aluminio.
- Porcentaje de carga fundente 200 %.
- Tiempo 60 min.
- Composición de la carga fundente 50 % NaCl y 50 % KCl.

2.3.2. ENSAYOS DE VARIACIÓN DEL TIEMPO DE FUSIÓN

Los ensayos de variación de tiempo de fusión se realizaron con condiciones constantes de porcentaje de carga fundente, composición de las sales y temperatura de fundición

Se realizaron cuatro ensayos con periodos de tiempo de 15, 30, 60 y 90 min.

Las condiciones constantes para los ensayos fueron:

- Masa inicial 2 g de láminas de aluminio.
- Porcentaje de carga fundente 200 %.
- Temperatura 750°C.
- Composición de la carga fundente 50 % NaCl y 50 % KCl.

2.3.3. ENSAYOS DE VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE CARGA FUNDENTE

Los ensayos de variación de porcentaje de carga fundente con respecto a la cantidad de aluminio inicial fueron realizados con parámetros constantes de composición de las sales, tiempo, temperatura de fundición.

Se estudió la adición de carga fundente a partir de 200 % de sales con respecto al aluminio debido a que esa cantidad de fundente permitió cubrir la totalidad del área superficial de las láminas de aluminio.

Se realizaron tres ensayos con para porcentajes de carga fundente con respecto a la carga inicial de 200, 300, 400 % de carga, además se evaluó el proceso sin carga fundente.

Las condiciones constantes para los ensayos fueron:

- Masa inicial 2 g de láminas de aluminio.
- Temperatura 750°C.
- Tiempo 30 min.
- Composición de la carga fundente 50 % NaCl y 50 % KCl.

2.3.4. ENSAYOS DE ADICIÓN DE FLUORURO DE POTASIO (KF)

Se realizaron ensayos con las mejores condiciones obtenidas con los diferentes parámetros y con la adición de fluoruro de potasio (KF) en mínimas cantidades con porcentaje de 5 % y 10 % con respecto a la carga fundente.

Las condiciones utilizadas para estos ensayos se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros para la adición de fluoruro de potasio

| Masa inicial (g) | % Carga Fundente | %NaCl | %KCl | %KF | Tiempo (min) | Temperatura (°C) |
|------------------|------------------|-------|------|------|--------------|------------------|
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 0,0 | 30 | 750 |
| 2,0 | 200,0 | 47,5 | 47,5 | 5,0 | 30 | 750 |
| 2,0 | 200,0 | 45,0 | 45,0 | 10,0 | 30 | 750 |

2.3.5. ENSAYOS DE FUNDICIÓN DE LÁMINAS DE ALUMINIO/POLIETILENO

Los ensayos de fundición de láminas de aluminio/polietileno se realizaron con los mejores parámetros obtenidos de los ensayos previos. La variación en estos ensayos se realizó con respecto al tipo y cantidad de material inicial para la fundición.

Tabla 2.2 Parámetros para fundición de láminas de aluminio/polietileno

| Tipo de material | Masa inicial (g) | % Carga Fundente | %NaCl | %KCl | %KF | Tiempo (min) | Temperatura (°C) |
|------------------|------------------|------------------|-------|------|------|--------------|------------------|
| Al | 2,0 | 200,0 | 47,5 | 47,5 | 5,0 | 30 | 750 |
| PEAL | 4,5 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 0,0 | 30 | 750 |
| PEAL | 4,5 | 200,0 | 45,0 | 45,0 | 10,0 | 30 | 750 |
| PEAL | 4,5 | 200,0 | 47,5 | 47,5 | 5,0 | 30 | 750 |

2.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DEL ALUMINIO OBTENIDO PARA DETERMINAR SUS APLICACIONES COMERCIALES.

El producto final de la fundición fue caracterizado químicamente y mineralógicamente en el laboratorio de análisis del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

2.4.1. ANÁLISIS QUÍMICO DEL ALUMINIO

El análisis químico se realizó con el método de espectrofotometría de chispa con el equipo Bruker Q4 TASMAN.

La preparación de la muestra consistió en la elaboración de una pieza de superficie plana y lisa para una mejor lectura del equipo. La muestra fue moldeada con un martillo y pulida con lija.

También se analizó la muestra mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) Tescan Vega con micro analizador de rayos X Bruker (EDS), para obtener una imagen microscópica del aluminio fundido y un análisis semi cuantitativo elemental.

2.4.2. ANÁLISIS MINERALÓGICO DEL ALUMINIO

El análisis mineralógico se realizó por difracción de rayos X (DRX) en el equipo D8 Advance Bruker y los programas EVA y TOPAS. Este ensayo se realizó para determinar si la presencia de aluminio es como elemento o como compuesto.

La preparación de la muestra consistió en la obtención de limallas del aluminio fundido.

2.5. DETERMINACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS.

Se realizó la determinación del diseño conceptual de una planta para la recuperación de aluminio y pulpa de cartón a partir de envases multicapa. La planta se diseñó para

una capacidad de 200 t/mes, con base en los mejores resultados obtenidos durante la experimentación.

Para la determinación de la capacidad de la planta se tomó como referencia la capacidad de una planta de reciclaje de envases multicapa a gran escala de acuerdo a Neves y vos Zuben (2005), es de 1000 t/mes (p. 2).

Además se consideró que de acuerdo a Abarca y Muñoz (2012), la generación de desechos de envases multicapa de una ciudad como Guayaquil es de 1313 t/mes (p.120).

2.5.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE ENVASES MULTICAPA

Para la determinación del diagrama de flujo del proceso se tomó en cuenta los siguientes criterios:

- Capacidad de procesamiento de la planta
- Características de la materia prima
- Características de los productos
- Requerimiento de equipos e instalaciones

2.5.2. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

El dimensionamiento de los equipos necesarios para el proceso se realizó de acuerdo con los catálogos presentados en el Anexo III, con base en los siguientes criterios:

- Características de las corrientes de alimentación y salida.

- Balance de masa y energía de cada etapa del proceso.
- Capacidad de procesamiento de la maquinaria.
- Costo de los equipos.

2.5.2.1. Tanque desagregador

El tanque de desagregación se dimensionó con base en las características de las corrientes de entrada y de salida, para la capacidad necesaria en el proceso.

De acuerdo a la capacidad requerida, se determinó el volumen y se dimensionó la altura y el diámetro del tanque desagregador.

2.5.2.2. Tanque de lixiviación

El dimensionamiento del tanque de lixiviación se realizó con base en la capacidad de procesamiento en esta etapa de la planta.

De acuerdo a este parámetro, se determinó el volumen del equipo necesario y sus dimensiones de altura y diámetro.

2.5.2.3. Horno eléctrico

El horno eléctrico para la fundición se seleccionó con base en los datos de la capacidad necesaria en la etapa de fundición de aluminio.

Este equipo debe tener una capacidad que cumpla con los requerimientos de la planta con lixiviación y de la planta sin lixiviación.

2.5.2.4. Tamiz de pantalla

El tamiz de pantalla se seleccionó de acuerdo al criterio de la capacidad de procesamiento del material en esta etapa.

2.5.2.5. Equipo de destilación

El equipo de destilación se dimensionó con base en la capacidad necesaria de recuperación de solvente y de acuerdo a eso se determinó el volumen del tanque para esta operación.

2.6. ESTUDIO DE PRE FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA CON CAPACIDAD DE 200 t DE ENVASES MULTICAPA POR MES.

Se realizó un estudio de pre factibilidad de la instalación de una planta para la recuperación de aluminio de envases multicapa con una capacidad de 200 t/mes. El proyecto se evaluó con base en:

- Requerimiento de equipos
 - Tanque desagregador
 - Tanque de lixiviación
 - Horno eléctrico
 - Tamiz de pantalla
 - Equipo de destilación

- Requerimiento de insumos
 - Xileno
 - Cloruro de potasio

- Cloruro de sodio
- Fluoruro de potasio

- Costos de equipos
- Costos de insumos
- Costos de operación
 - Salarios del personal
 - Mantenimiento de equipos
 - Materia prima
 - Energía eléctrica
 - Agua

- Costos de producto
 - Aluminio
 - Pulpa de papel

Para determinar la factibilidad económica, se calculó el valor actual neto (VAN), y la tasa interna de retorno (TIR). El VAN se obtiene de la Ecuación 2.1:

$$VAN = -A + \sum_{t=1}^n Ft * (1 + i)^{-t} \quad [2.1]$$

Donde:

Ft = valor neto de flujos de caja
 i = tasa de retorno del período.
 t = periodo de tiempo

El TIR es la tasa de retorno que ocasiona que el valor actual neto sea igual a cero. Otro indicador que se utilizó para el análisis económico fue la relación beneficio costo (B/C).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los mejores resultados se realizó el diseño de la planta para recuperación de aluminio con una capacidad de 200 t/mes. Además se elaboró la evaluación económica para determinar la factibilidad de su instalación y operación.

3.1. ENSAYOS DE SEPARACIÓN DE LA LÁMINA DE CARTÓN Y LA PRIMERA LÁMINA DE POLIETILENO MEDIANTE AGITACIÓN CON AGUA.

Los ensayos de separación de las primeras capas de los envases multicapa, que corresponden a lámina de polietileno y cartón, se realizaron siguiendo la metodología presentada en la sección 2.1.1. Los parámetros de potencia de la agitación y cantidad de agua se mantienen constantes en valores de 2 hp y 100 L respectivamente. La cantidad de envases que se procesan es el parámetro variable de esta operación. Se evalúa para determinar las condiciones óptimas en las se puede trabajar para obtener la separación de la pulpa de papel del resto del envase.

Se realizaron ensayos con cargas de 280, 560, 840 y 1 120 g de envases multicapa por lote. Los envases que se utilizaron para los ensayos son de características similares y de un peso promedio de 28 g. La agitación con agua, de los envases multicapa, permite separar la pulpa de papel y obtener una lámina de polietileno/aluminio. Los resultados de los ensayos se presentan en las fichas técnicas del Anexo IV.

La relación entre la cantidad de envases y la cantidad de láminas se representa mediante la eficiencia de la agitación. La carga de 10 envases multicapa (280 g) presenta resultados de recuperación de láminas de polietileno/aluminio según se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Recuperación de láminas de polietileno/aluminio con 2 hp de agitación, 100 L de agua y carga de 10 envases multicapa (280 g).

| Masa de envases (g) | Cantidad de envases | Tiempo (min) | Cantidad de láminas | Recuperación (%) |
|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|------------------|
| 280 | 10 | 10 | 0 | 0,0 |
| 280 | 10 | 20 | 0 | 0,0 |
| 280 | 10 | 30 | 0 | 0,0 |
| 280 | 10 | 40 | 2 | 20,0 |
| 280 | 10 | 50 | 4 | 40,0 |
| 280 | 10 | 60 | 7 | 70,0 |

Los resultados de recuperación representa el porcentaje de láminas de polietileno/aluminio obtenidas. Para la carga de 280 g de envases multicapa se alcanzan valores muy bajos. Durante el periodo de tiempo que se estudió, el material procesado no desprendió en su totalidad de la lámina de cartón. Tan solo en el 70 % de la carga se desagregó, dejando envases completos que no fueron afectados por el proceso de atrición.

La carga utilizada para este ensayo no fue suficiente para producir la fricción necesaria entre los envases multicapa y favorecer la separación de las diferentes capas. Con el objetivo de determinar la cantidad de material óptima que permita la mejor separación de las láminas, se aumenta la cantidad de envases en las cargas de materia prima para realizar nuevos ensayos. Los resultados de recuperación que se obtiene al aumentar la carga a 20 envases (560 g), se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Recuperación de láminas de polietileno/aluminio con 2 hp de agitación, 100 L de agua y carga de 20 envases multicapa (560 g).

| Masa de Envases (g) | Cantidad de Envases | Tiempo (min) | Cantidad de láminas | Recuperación (%) |
|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|------------------|
| 560 | 20 | 10 | 0 | 0,0 |
| 560 | 20 | 20 | 0 | 0,0 |
| 560 | 20 | 30 | 3 | 15,0 |
| 560 | 20 | 40 | 8 | 40,0 |
| 560 | 20 | 50 | 13 | 65,0 |
| 560 | 20 | 60 | 20 | 100,0 |

El aumento de la cantidad de envases, que se procesan bajo las condiciones establecidas, produce un incremento en la recuperación de polietileno/aluminio porque se favorece la fricción entre las láminas. Se alcanza el 100 % de láminas separadas con respecto a la cantidad de envases procesados al terminar el tiempo de estudio de 60 minutos.

Se disminuye el tiempo en obtener las primeras láminas y se aumenta la cantidad de envases que se han desagregado. El tiempo en el que se consigue obtener las primeras láminas de polietileno/aluminio es 30 minutos, en este tiempo se alcanza el 15 % de eficiencia de la separación.

Para el siguiente ensayo se aumentó la cantidad de envases multicapa en la carga inicial al proceso de desagregación. Bajo las mismas condiciones de los ensayos anteriores se procesó la nueva carga y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Recuperación de láminas de polietileno/aluminio con 2 hp de agitación, 100 L de agua y carga de 30 envases multicapa (840 g).

| Masa de Envases (g) | Cantidad de Envases | Tiempo (min) | Cantidad de láminas | Recuperación (%) |
|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|------------------|
| 840 | 30 | 10 | 4 | 13,3 |
| 840 | 30 | 20 | 19 | 63,3 |
| 840 | 30 | 30 | 29 | 96,6 |
| 840 | 30 | 40 | 30 | 3,3 |
| 840 | 30 | 50 | 30 | 0,0 |
| 840 | 30 | 60 | 30 | 0,0 |

Los resultados del ensayo de desagregación con 30 envases como materia prima muestran un aumento en la eficiencia de la separación en menor tiempo de procesamiento. Tan solo en 10 minutos de operación ya se obtienen láminas de polietileno/aluminio de las que se ha desprendido la lámina de cartón.

En la etapa de desagregación de los envases multicapa, bajo las condiciones estudiadas, se obtiene resultados de 100 % de separación de la pulpa de papel en

40 minutos de procesamiento, el 90 % del papel se separa dentro de los primeros treinta minutos de agitación con agua. La Figura 3.1, presenta la variación de la cantidad de material obtenido durante el proceso de desagregación.

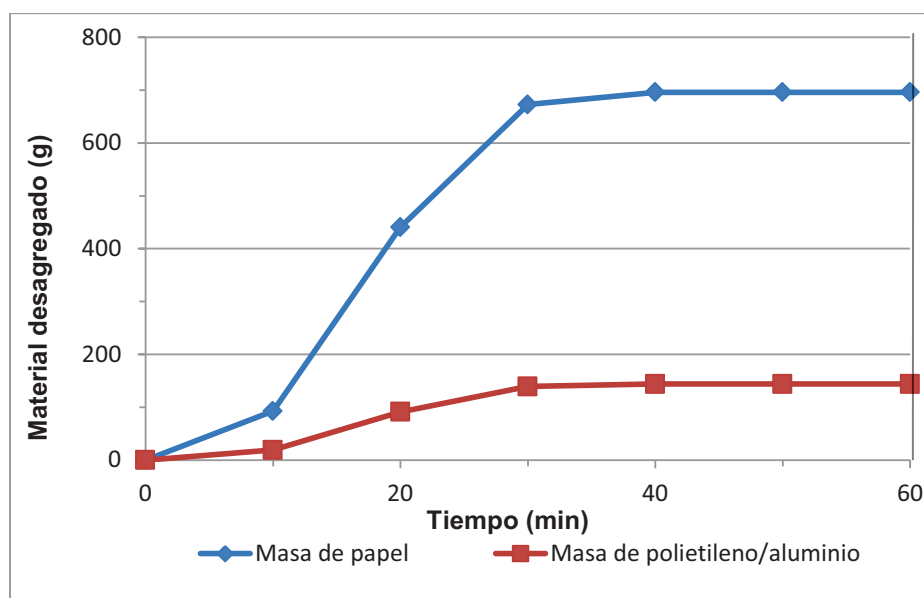


Figura 3.1 Variación de la cantidad de material desagregado con respecto al tiempo, 840 g de envases multicapa en 100 L de agua.

La mayor cantidad de láminas de polietileno/aluminio y de papel, se separa luego de 20 minutos de desagregación.

El proceso de agitación con agua de los envases multicapa da como resultado la obtención de láminas formadas por una fina capa de aluminio cubierta de polietileno de baja densidad.

Durante todo el periodo de estudio, la totalidad carga inicial se convirtió en láminas de polietileno/aluminio. Se alcanzó el 100 % de desagregación en menos de 40 minutos. Los resultados de los ensayos con 30 envases (840 g) muestran alta eficiencia en la separación y reducción del tiempo necesario para procesar la totalidad de la carga. El 96 % de envases se desagregaron en 30 minutos.

Por último se analizó la desagregación de los envases con una carga inicial de 40 empaques multicapa. Las condiciones de operación fueron las mismas en todos los ensayos de desagregación y se estudio la eficiencia de la separación con respecto al tiempo de operación.

La eficiencia del proceso al operar con 40 envases (1120 g) se presenta en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Recuperación de láminas de polietileno/aluminio con 2 hp de agitación, 100 L de agua y carga de 40 envases multicapa (1120 g).

| Tiempo (min) | Cantidad de láminas | Recuperación (%) |
|--------------|---------------------|------------------|
| 10 | 6 | 15,0 |
| 20 | 24 | 60,0 |
| 30 | 40 | 100,0 |
| 40 | 0 | 0,0 |
| 50 | 0 | 0,0 |
| 60 | 0 | 0,0 |

El aumento en la cantidad de envases en la carga de material inicial produce incremento en la eficiencia de la separación de la pulpa de papel con respecto al tiempo de operación. La totalidad de los envases se procesaron en 30 minutos, en los primeros 10 minutos se alcanzó la separación de 6 envases que corresponde al 15,0 % de la carga.

Esto indica que la separación es un proceso que se realiza en periodos de tiempo cortos. La cantidad de envases multicapa utilizada para los ensayos con 40 envases representa un peso de 1 120 g de material, la relación de carga inicial con el agua del proceso es 1,1 %.

En la Figura 3.2 se presenta el comportamiento de los envases en el proceso de desagregación al tratar 40 envases por lote.

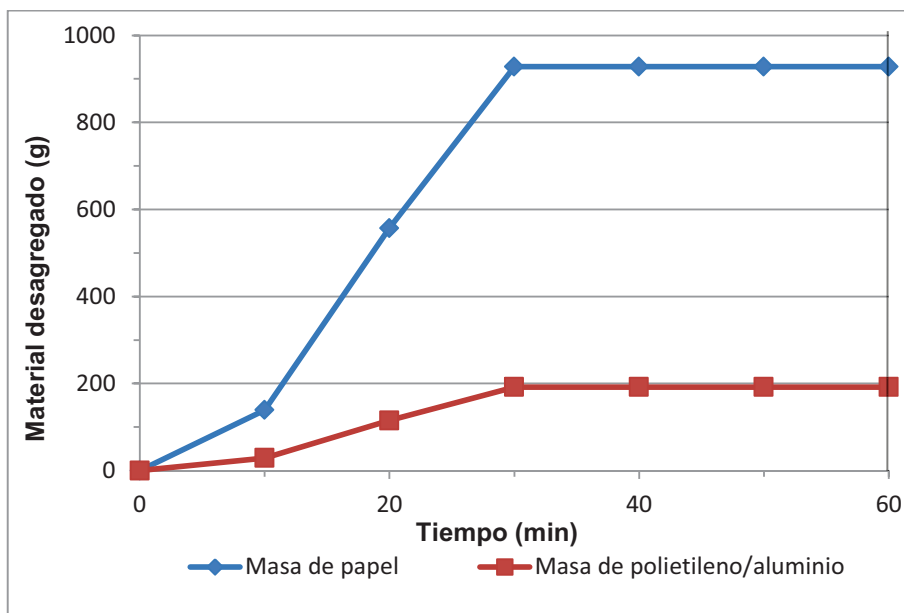


Figura 3.2 Variación de la cantidad de material desagregado con respecto al tiempo, 1 120 g de envases multicapa en 100 L de agua.

Los ensayos en los que se obtuvo mejor recuperación son los que se realizaron con 30 y 40 envases multicapa (840, 1 120 g). La eficiencia del 100 % de separación de la pulpa de papel se alcanza en 30 min.

La acción que genera la mayor desagregación es aumentar la fricción entre el material y facilitar el contacto del agua. El aumento de la cantidad de envases con respecto a la cantidad de agua utilizada, por encima del 15 %, puede generar dificultad en la fricción y por lo tanto disminuir la eficiencia de la separación de la pulpa de papel.

El periodo de operación para la separación de las láminas que componen un envase multicapa es corto. Se puede afirmar que el tiempo de procesamiento está en el rango de 30 a 40 minutos, dentro de este rango se alcanza una separación mayor a 95 %. La elección del tiempo de operación óptimo para el procesamiento depende de la planificación de la producción. Si el requerimiento es operar la desagregación de los envases con mayor cantidad de ciclos, entonces el tiempo deberá ser menor. Si

el material continúa en el proceso después de la separación de la pupa de papel, puede producirse fraccionamiento de las láminas de polietileno/aluminio. Los ensayos de desagregación de los envases multicapa, da como resultado la separación de la pulpa de papel y la obtención de láminas de polietileno/aluminio.

La pulpa de papel tiene alto contenido de humedad por lo tanto es retenida en una malla para recuperar el agua y poder recircularla al proceso. La pulpa de papel no es el principal producto que se busca obtener con este trabajo, por la tanto se considera como un residuo aprovechable. El único tratamiento que se dio a la pulpa es el secado.

De acuerdo al objetivo de este trabajo, el principal producto del ensayo de separación de desagregación es el material compuesto de polietileno/aluminio. Este material se obtiene en forma laminada de cada envase multicapa procesado. La Figura 3.3 muestra las láminas obtenidas mediante la agitación con agua de los envases multicapa.



Figura 3.3 Láminas de polietileno/aluminio

Las láminas están formadas por dos capas externas de polietileno que cubren el aluminio en el interior. Estas capas se encuentran fuertemente unidas, la desagregación en agua no produce su separación.

A pesar de procesar envases multicapa de características similares, no se obtiene un producto totalmente homogéneo. El peso promedio de las láminas de polietileno/aluminio es de 5 g.

El peso y la forma de las láminas puede ser variable y depende de factores como:

- Fraccionamiento de las láminas.
- Impurezas de pulpa de papel impregnadas.

Un ejemplo de láminas de polietileno/aluminio con impurezas ocasionadas por la impregnación de pulpa de papel se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Lámina de polietileno aluminio contaminada con pulpa de papel

3.2. ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO CON XILENO, TRICLORO BENCENO PUROS Y EN SOLUCIÓN CON ETANOL 50 %.

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos de lixiviación realizados a las láminas de polietileno/aluminio con el objetivo de separar la capa de polímero y obtener aluminio de los envases multicapa. Las fichas técnicas se detallan en el Anexo V.

3.2.1. ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO CON SOLVENTES

Los ensayos de lixiviación de polietileno con solventes se realizaron de acuerdo a la metodología presentada en la sección 2.2.

Los parámetros constantes para los ensayos de lixiviación fueron: volumen de solvente, temperatura, y cantidad de material inicial. El parámetro variable es el tiempo, se evalúa a lixiviación durante 3 horas de operación.

La cantidad de 5 g de polietileno/aluminio contiene aproximadamente 1,4 g de aluminio lo que corresponde al 5 % de la masa promedio de un envase multicapa (Araujo et al, 2007).

Por lo tanto la lámina de polietileno/aluminio contiene 3,6 g de polietileno, es decir que la lixiviación debe disminuir en 70 % de la masa de la lámina.

De acuerdo a datos experimentales el porcentaje de aluminio presente en un envase multicapa es del 7,3 %, lo que representa 2 g de aluminio (Endara, 2004). Esta composición del envase conlleva una disminución en la cantidad de polietileno que debe lixivarse y disminución de la pérdida de masa a 60 %.

Se presentan los resultados obtenidos con respecto a la pérdida de masa del material procesado. A mayor pérdida de masa, la cantidad de polímero desprendido de las láminas es mayor y se obtiene láminas de aluminio de mayor pureza.

3.2.1.1. Ensayos de lixiviación de polietileno con xileno puro

El material proveniente del proceso de desagregación, constituido por polietileno/aluminio fue procesado mediante lixiviación con xileno para desprender la capa de polímero. Los resultados de la lixiviación de polietileno, con xileno como solvente, se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Pérdida de masa de láminas de polietileno/aluminio luego de lixiviación con xileno puro

| Tiempo (min) | Masa Inicial (g) | Masa Final (g) | Pérdida de masa (%) |
|--------------|------------------|----------------|---------------------|
| 30 | 5,0 | 3,6 | 27,9 |
| 60 | 4,9 | 2,9 | 40,6 |
| 90 | 5,1 | 2,8 | 44,1 |
| 120 | 5,0 | 2,7 | 44,4 |
| 180 | 4,9 | 2,7 | 44,5 |

La pérdida de masa de las láminas de polietileno/aluminio alcanza 44,1 % luego de 90 minutos de operación, a partir de este tiempo el porcentaje de pérdida de masa no tiene un incremento significativo.

El porcentaje de pérdida de masa de la muestra a 60 minutos de lixiviación presenta un valor mayor al 40,0 %. Los resultados obtenidos de la lixiviación utilizando xileno como solvente presenta un alto porcentaje de pérdida de masa, gran parte del polietileno contenido en el material se desprendió de las láminas.

De acuerdo a datos bibliográficos y experimentales, detallados en la sección 3.2.1, el porcentaje ideal de pérdida de masa de la lámina de polietileno aluminio esta en el

rango de 60,0 a 70,0 %. Por lo tanto se puede considerar que la lixiviación utilizando xileno presenta buenos resultados.

3.2.1.2. Ensayos de lixiviación de polietileno con xileno con etanol 50 %

Los ensayos de lixiviación utilizando como solvente una mezcla de xileno y etanol al 50 % se realizaron con el objetivo de determinar la posibilidad de disminuir el uso de xileno. El xileno es soluble en etanol lo que facilita su mezcla.

Los resultados de pérdida de masa de las láminas de polietileno/aluminio lixiviadas con la mezcla de xileno y etanol se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Pérdida de masa de láminas de polietileno/aluminio luego de lixiviación con mezcla de xileno y etanol 50 %

| Tiempo (min) | Masa Inicial (g) | Masa Final (g) | Pérdida de masa (%) |
|--------------|------------------|----------------|---------------------|
| 30 | 5,0 | 4,8 | 3,4 |
| 60 | 5,0 | 4,6 | 6,6 |
| 90 | 4,9 | 4,4 | 10,5 |
| 120 | 4,9 | 4,3 | 11,7 |
| 180 | 5,0 | 4,3 | 12,6 |

Los porcentajes de pérdida de masa de las láminas de polietileno/aluminio son muy bajos, luego de 3 horas de lixiviación a penas se depende menos de 13,0 % de la masa.

La pérdida de masa ideal esta en el rango de 60,0 a 70,0 %. Por lo tanto se puede concluir que la mezcla de xileno y etanol al 50,0 % utilizada como solvente, no produce resultados satisfactorios en la lixiviación de polietileno.

La principal causa para que la mezcla de xileno y etanol no presente buenos resultados, es la diferencia de puntos de ebullición de sus componentes. La diferencia de temperatura de ebullición entre los dos líquidos es de 60°C. Al ser dos

líquidos con puntos de ebullición con gran diferencia de temperatura, esto ocasiona que en el equipo de extracción soxhlet, el componente de menor punto de ebullición pase ha estado gaseoso y se condense manteniendo el reciclo solo de este componente, el componente de mayor punto de ebullición no alcanza la temperatura necesaria para alcanzar el equilibrio de cambio de estado y por lo tanto se mantiene en forma líquida en la parte inferior del equipo de extracción sin llegar a tener contacto con el polietileno.

3.2.1.3. Ensayos de lixiviación de polietileno con tricloro benceno puro

Los ensayos de lixiviación con tricloro benceno se realizaron con la finalidad de evaluar la diferencia de dos tipos de solventes en la pérdida de masa de las láminas de polietileno/aluminio.

Los resultados de la lixiviación de polietileno con tricloro benceno como solvente se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Pérdida de masa de láminas de polietileno/aluminio luego de lixiviación con tricloro benceno puro

| Tiempo (min) | Masa Inicial (g) | Masa Final (g) | Pérdida de masa (%) |
|--------------|------------------|----------------|---------------------|
| 30 | 4,9 | 3,9 | 20,0 |
| 60 | 4,9 | 3,3 | 33,0 |
| 90 | 5,0 | 3,2 | 34,2 |
| 120 | 5,0 | 3,0 | 38,4 |
| 180 | 4,9 | 2,9 | 41,6 |

Como resultado de la lixiviación con tricloro benceno se obtiene un porcentaje de disminución de la masa de 41,6 % luego de 3 horas de operación. Para tiempos menores a 2 horas, los valores de reducción de la masa de las láminas de polietileno/aluminio son bajos en relación a la masa de polímero.

La lixiviación de polietileno con tricloro benceno como solvente en un equipo de extracción soxhlet, tiene como dificultad el alto punto de ebullición del líquido, que se alcanza a una temperatura de 213°C. Por lo tanto alcanzar el equilibrio de cambio de estado requiere mayor tiempo de calentamiento

3.2.1.4. Ensayos de lixiviación de polietileno con tricloro benceno con etanol 50 %

Se realizaron ensayos de lixiviación de la lámina de polietileno/aluminio obtenidas de la separación de componentes de los envases multicapa.

El estudio se realizó para determinar la factibilidad de mezclar tricloro benceno y etanol en relación 1:1 para disminuir el uso de tricloro benceno en el proceso.

Los resultados de la evaluación de tricloro benceno como solvente en la lixiviación de polietileno se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Pérdida de masa de láminas de polietileno/aluminio luego de lixiviación con mezcla de tricloro benceno y etanol 50 %

| Tiempo (min) | Masa Inicial (g) | Masa Final (g) | Pérdida de masa (%) |
|--------------|------------------|----------------|---------------------|
| 30 | 4,9 | 4,8 | 3,2 |
| 60 | 5,0 | 4,7 | 6,1 |
| 90 | 5,0 | 4,6 | 6,6 |
| 120 | 5,0 | 4,6 | 7,1 |
| 180 | 4,9 | 4,6 | 7,4 |

Los resultados de la disminución de la masa de las láminas de polietileno/aluminio son muy bajos. Se alcanza valores menores a 10,0 % de la pérdida de masa luego de 3 horas de tratamiento con la mezcla diluyente.

Los valores presentados en la Tabla 3.8 muestran que la mezcla tricloro benceno y etanol al 50 % no es eficiente para la lixiviación.

La deficiencia de la mezcla se debe a la gran diferencia de temperaturas de ebullición. Las láminas de polietileno y aluminio solo tienen contacto con el solvente condensado, y al tener el etanol menor temperatura de ebullición, este líquido se evapora y condensa antes que el tricloro benceno.

La lixiviación del polietileno que recubre el aluminio contenido en los envases multicapa da como resultado la obtención de láminas del metal cubierto por polietileno remanente, es decir la lixiviación fue totalmente deficiente.

La lixiviación con mezcla de solventes y etanol no dio buenos resultados y la separación del polietileno fue deficiente.

La comparación del comportamiento del polietileno tratado con xileno y tricloro benceno se presenta en la Figura 3.5.

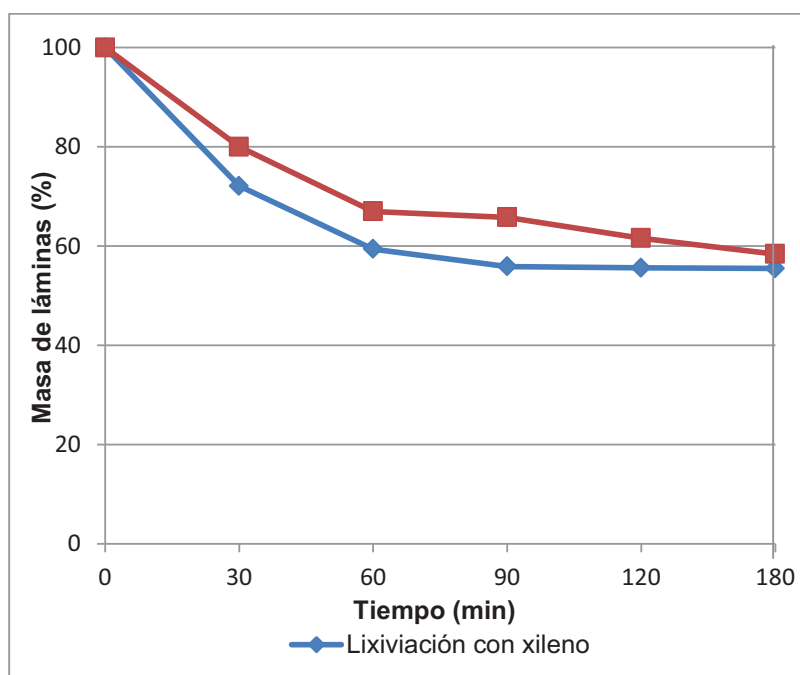


Figura 3.5 Pérdida de masa de las láminas de polietileno/aluminio en el proceso de lixiviación con solventes con respecto al tiempo.

Los valores de pérdida de masa, obtenidos de los ensayos con tricloro benceno como solvente, son menores que correspondientes a los ensayos con xileno.

El valor máximo de disminución de masa para la experimentación con tricloro benceno en 41,6 % luego de 180 minutos de lixiviación.

Al compararse los resultados de pérdida de masa para tiempo de 90 minutos se tiene una diferencia de 10,0 % entre los resultados obtenidos en la lixiviación con xileno y los de la lixiviación con tricloro benceno.

3.2.1.5. Láminas de aluminio luego de la lixiviación de polietileno

El proceso de lixiviación de las láminas de polietileno/aluminio con solventes disminuye la cantidad de polietileno presente en la superficie de las láminas de aluminio.

Las láminas de aluminio que se obtienen de la lixiviación del material compuesto de polietileno/aluminio presentan características de rugosidad y fragilidad distintivas, estas características permiten identificar la disminución del recubrimiento de polietileno.

Las láminas de metal son muy delgadas y el polietileno ayuda a mantener el aluminio en forma laminada. Si el polietileno es desprendido entonces la capa metálica se vuelve muy frágil y se producen fraccionamientos.

En la Figura 3.6 se presenta la comparación de las láminas obtenidas de la lixiviación con los diferentes solventes utilizados.

| | |
|--|---|
|  <p>a</p> | <p>La mayor parte del polietileno presente fue removido. Se puede observar el aumento de la rugosidad en la superficie. No se puede obtener una sola lámina de aluminio sino que se obtienen pedazos pequeños, esto se debe al aumento de la fragilidad de la lámina ocasionada por la disminución del polietileno.</p> |
|  <p>b</p> | <p>Presenta rugosidad en la superficie de la lámina y también brillo metálico, aunque no presenta fraccionamiento. No se produce fraccionamiento de la lámina debido a que el aluminio está cubierto por dos capas de polietileno y la lixiviación solamente desprendió la capa anterior.</p> |
|  <p>c</p> | <p>Se separó la mayor parte de. Se observa aumento en la rugosidad de la superficie. Se obtienen pedazos pequeños, debido al aumento de la fragilidad de la lámina producto de la disminución del polietileno.</p> |
|  <p>d</p> | <p>No presenta rugosidad ni fraccionamiento, además se observa un color opaco en una región de la lámina. Estas características evidencian la presencia de polietileno remanente en las láminas lixiviadas con la mezcla de tricloro benceno y etanol.</p> |

Figura 3.6 Comparación de las láminas obtenidas del proceso de lixiviación: a) lixiviación con xileno puro, b) lixiviación con xileno/etanol 1:1, b) lixiviación con tricloro benceno puro, d) lixiviación con tricloro benceno/etanol 1:1

Las láminas de aluminio que se obtuvieron de la lixiviación con solventes, son muy delgadas, frágiles, y rugosas. La diferencia entre el material inicial antes de la lixiviación y la lámina metálica resultado del proceso, se puede observar en la Figura 3.7.

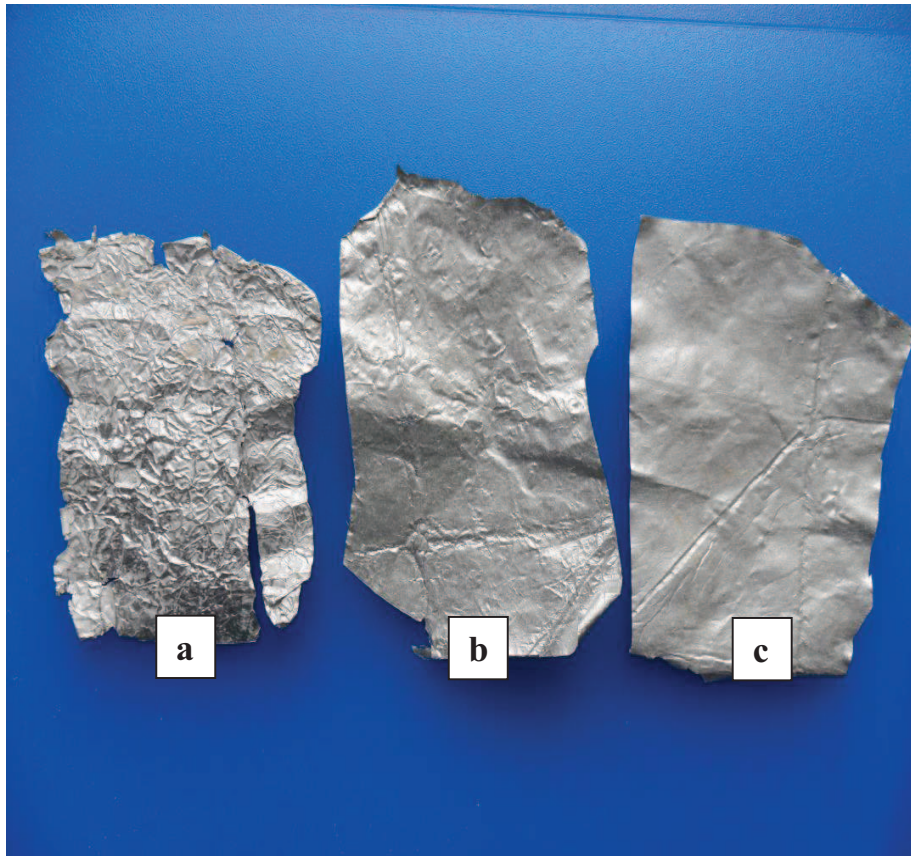


Figura 3.7 Comparación de láminas luego de desagregación y luego de lixiviación: a) aluminio obtenido de lixiviación con xileno, b) y c) polietileno/aluminio del proceso de desagregación.

En la Figura 3.7 se presenta la diferencia entre la lámina de aluminio luego de la lixiviación con xileno (Figura 3.7a) y láminas de polietileno/aluminio obtenidas de la desagregación de los envases (Figuras 3.7b y 3.7c). La disminución de la cantidad de polietileno se evidencia por el aumento de la rugosidad en la superficie de la lámina.

3.2.2. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS LÁMINAS DE ALUMINIO

Las láminas de aluminio obtenidas de la separación de capas de los envases multicapa fueron analizadas para conocer su composición química. La metodología de análisis se presenta en la sección 2.2.2, y los resultados de la composición de las láminas metálicas se presentan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Análisis químico de las láminas metálicas obtenidas de la lixiviación de polietileno con solventes

| Elemento | Porcentaje (%) | Elemento | Porcentaje (%) |
|----------|----------------|----------|----------------|
| Al | 96,60 | Zn | 0,00 |
| Si | 1,69 | Co | 0,00 |
| Fe | 1,21 | V | 0,06 |
| Cu | 0,05 | Pb | 0,19 |
| Mn | 0,01 | Sn | 0,06 |
| Mg | 0,00 | Sb | 0,00 |
| Ni | 0,01 | Cr | 0,00 |

El principal componente de las láminas metálicas obtenidas de la lixiviación del material de polietileno y aluminio con solventes es el aluminio con un porcentaje de 96,6 %. Las láminas metálicas no están compuestas por aluminio puro ya que existen impurezas que disminuyen el porcentaje de aluminio presenta en la muestra.

Las impurezas metálicas que constituyen parte de las láminas analizadas y que se encuentran en mayor porcentaje son de hierro y silicio. Estas impurezas constituyen aproximadamente el 3 % del total de la composición química de las láminas y se presentan en forma de óxidos metálicos.

La presencia de estos metales se confirma en la Tabla 1.5 de la sección 1.2.3.3 en la que se presenta el análisis químico de aluminio reciclado a partir de envases multicapa mediante la técnica de plasma térmico.

3.2.3. RECUPERACIÓN DE SOLVENTE

La recuperación de solvente se realizó siguiendo la metodología detallada en la sección 2.2.3. En la Figura 3.8 se muestra la diferencia de color del solvente contaminado con polietileno de color amarillo opaco y el solvente recuperado transparente debido a que se ha separado de impurezas de polímero.



Figura 3.8 Recuperación de solvente

3.3. ENSAYOS DE FUNDICIÓN DE LAS LÁMINAS DE ALUMINIO CON CLORURO DE SODIO, CLORURO DE POTASIO Y FLUORURO DE POTASIO.

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos de fundición. Se realizaron varios ensayos para determinar las mejores condiciones de operación para la recuperación de mayor cantidad de aluminio puro. Las fichas técnicas se detallan en el Anexo VI

Los parámetros que se estudiaron fueron:

- Variación de la temperatura
- Variación del tiempo de fusión
- Variación de la cantidad de carga fundente
- Adición de fluoruro de potasio (KF)
- Eficiencia de la lixiviación (fundición de láminas de polietileno/aluminio)

Los ensayos de fundición se realizaron de acuerdo a la metodología experimental detallada en la sección 2.3.

3.3.1. ENSAYOS DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA

Los ensayos de fundición para evaluar la variación de la temperatura de fusión se efectuaron en temperaturas en el rango de 700 a 900°C. Los parámetros de cantidad de material a fundirse, porcentaje de carga fundente, composición de la carga fundente y el tiempo fueron constantes para determinar el comportamiento del aluminio a diferentes temperaturas de fundición.

El rango de temperatura en el que se evaluó la fundición se determinó de acuerdo al punto de fundición de aluminio de 660,4°C y a la temperatura del punto eutéctico de la mezcla de sales fundentes (Tottem y Mackenzie, 2003).

La mezcla binaria de sales fundentes se determinó con base en el análisis de los diagramas de fase presentados en la Figura 1.9 y en el Anexo II. El criterio para determinar la mezcla de sales más adecuada fue la cercanía del punto eutéctico de las sales con el punto de fusión del aluminio. Por lo tanto se consideró que la mezcla de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl) con punto de fusión a 667°C produciría mejores resultados (Tottem y Mackenzie, 2003).

Se evaluó la fundición de aluminio con temperatura inicial de 700°C y el aumento de 50°C hasta llegar a 900°C.

Los resultados que se obtienen de los ensayos de fundición son la cantidad de masa fundida recuperada. En la Tabla 3.10 se presentan los resultados de los ensayos de variación de temperatura.

Tabla 3.10 Resultados de la variación de temperatura de fundición

| Masa inicial (g) | % Carga Fundente | %NaCl | %KCl | Tiempo (min) | Temp (°C) | Masa recuperada (g) | Recuperación (%) |
|------------------|------------------|-------|------|--------------|-----------|---------------------|------------------|
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 60 | 700 | 0,6 | 30,0 |
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 60 | 750 | 0,7 | 35,0 |
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 60 | 800 | 0,7 | 35,0 |
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 60 | 850 | 0,6 | 30,0 |
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 60 | 900 | 0,4 | 20,0 |

Los resultados de la fundición de las láminas de aluminio no presentan altos porcentajes de recuperación de la fase metálica. La principal razón para obtener una relación baja entre a cantidad de material procesado por fundición y el producto final es la oxidación del aluminio.

La mayor parte del material se convierte en óxido de aluminio debido a la alta reactividad del aluminio con el oxígeno y con la humedad (Gallo, 2002, p. 8; Totten y Mackenzie, 2003, p. 119).

El aumento de temperatura provoca mayor oxidación del aluminio y la generación de mayor cantidad de óxido de aluminio. Mantener la mezcla fundida a temperaturas muy elevadas perjudica la fundición del aluminio (Aspin, 1995, p. 80), es así que la menor recuperación se produce a 900°C.

En la Figura 3.9 se presenta el comportamiento del material durante la fundición con variación de temperatura.

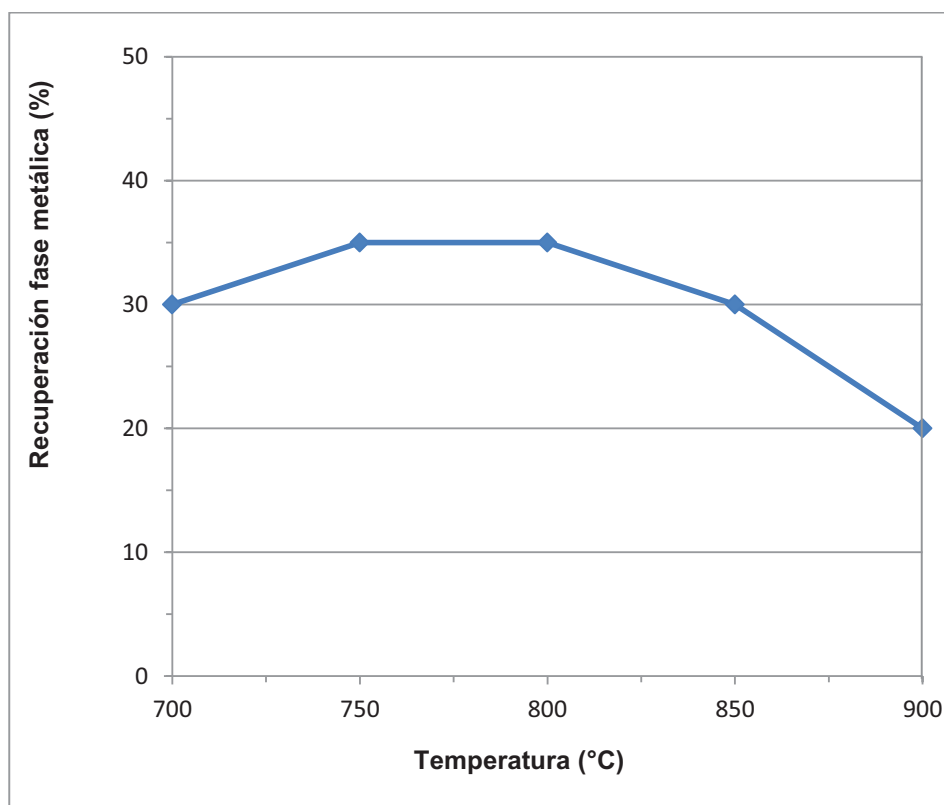


Figura 3.9 Recuperación de fase metálica con variación de temperatura, para 30 minutos de fusión, 200 % de carga fundente de NaCl (50 %) y KCl (50 %)

El máximo valor de porcentaje de recuperación de fase metálica 35 %, se obtiene dentro del rango de 750°C a 800°C. La temperatura de 750°C permite obtener la mayor cantidad de material metálico con la menor cantidad de energía, por lo tanto se determinó esa temperatura para el proceso de fundición.

A temperaturas superiores a 800°C disminuye la recuperación de fase metálica. Esto se debe a que la temperatura y el tiempo de fundición son parámetros que influyen en el aumento de la oxidación del aluminio fundido.

Con temperaturas menores a 750°C la recuperación de aluminio es menor porque no se alcanza la fusión de las sales por lo tanto no se crea la capa protectora para evitar la oxidación del metal.

3.3.2. ENSAYOS DE VARIACIÓN DEL TIEMPO DE FUSIÓN

El tiempo de fusión que provoca mejores resultados se evaluó manteniendo constante los parámetros de masa inicial, porcentaje de carga fundente, composición de la carga fundente, y temperatura.

La temperatura de 750°C se estableció con base en los mejores resultados de la sección 3.3.1. La variación del tiempo de fusión se evaluó para tiempos de 15, 30, 60 y 90 minutos de acuerdo al porcentaje de recuperación de fase metálica al finalizar el proceso.

Los resultados de recuperación de fase metálica para cada tiempo estudiado se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Resultados de la variación del tiempo de fusión a 750°C

| Masa inicial (g) | % Carga Fundente | %NaCl | %KCl | Tiempo (min) | Masa recuperada (g) | Recuperación (%) |
|------------------|------------------|-------|------|--------------|---------------------|------------------|
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 15 | 0,10 | 5,0 |
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 30 | 0,80 | 40,0 |
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 60 | 0,70 | 35,0 |
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 90 | 0,70 | 35,0 |

Con la fundición a 750°C durante 15 minutos obtiene recuperación muy baja, esto se debe a que es una temperatura baja y durante ese tiempo de fundición no es suficiente para alcanzar el cambio de estado de la carga fundente y no se produce el recubrimiento del metal.

El producto de la fundición bajo estas condiciones es gran cantidad de óxido de aluminio y residuo de las sales que no fueron fundidas.

En la Figura 3.10 se muestra la variación de la recuperación de fase metálica en el proceso de fundición al variar el tiempo de operación

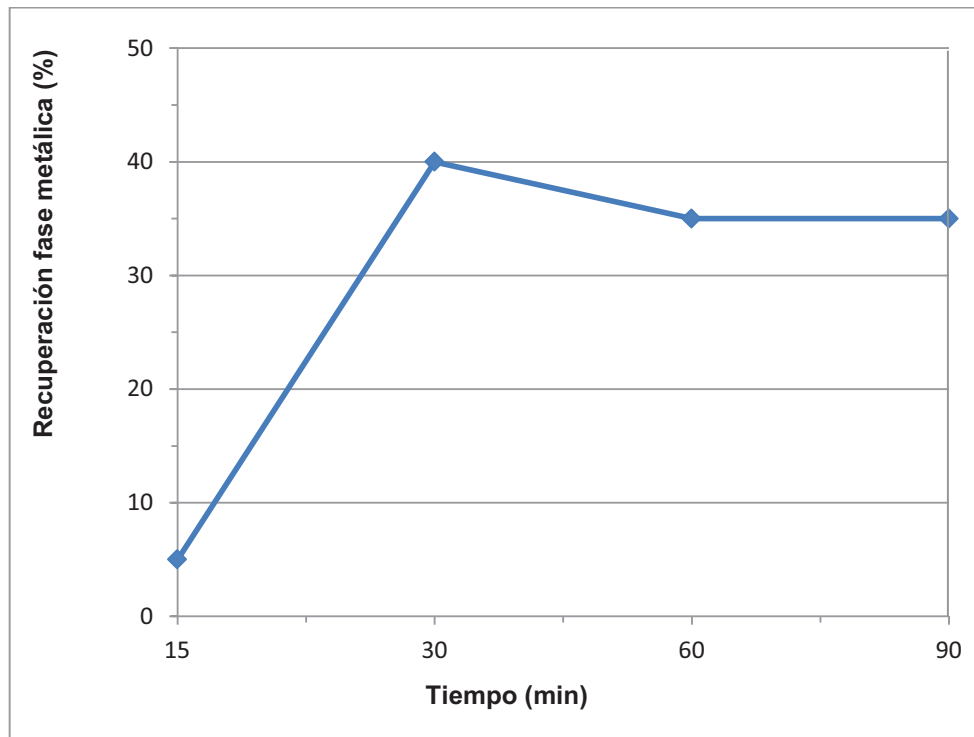


Figura 3.10 Recuperación de fase metálica en la fundición con variación de tiempo, para fusión a 750°C, 200 % de carga fundente de NaCl (50 %) y KCl (50 %)

A partir 30 minutos de fundición, se obtienen valores de recuperación de fase metálica mayores. La mejor recuperación se obtiene cuando el tiempo de fundición es 30 minutos. Para tiempos mayores la recuperación presenta disminución.

Al combinar la variación de temperatura y tiempo de fusión se obtiene mayor recuperación de aluminio. Las condiciones en las que se obtiene mejores resultados en la fusión del material son tiempo de 30 minutos y temperatura de 750°C.

La fundición de aluminio con tiempo de 30 minutos y temperatura de 750°C mejora la recuperación, pero no la coalescencia de las gotas de aluminio durante la fundición, por lo tanto los resultados de la fundición presentan una fase metálica dispersa. Esto puede deberse a que tanto la temperatura excesiva como tiempos de fundición demasiado extensos perjudica la fundición del aluminio (Aspin, 1995, p. 80).

3.3.3. ENSAYOS DE VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE CARGA FUNDENTE

Se realizaron ensayos para determinar la cantidad de carga fundente que se debe añadir a las láminas de aluminio para disminuir la oxidación del metal. Los parámetros de tiempo y temperatura se determinaron con base en los mejores resultados de la secciones 3.3.1 y 3.3.2, la composición de carga fundente fue 50 % de cloruro de sodio (NaCl) y 50 % de cloruro de potasio (KCl), y la cantidad de material inicial 2 g de láminas de aluminio.

Los resultados de los ensayos para determinar el porcentaje de de sales fundentes, con respecto a la cantidad de aluminio inicial para fundir, que se debe añadir a las láminas de aluminio para obtener mayor recuperación de fase metálica se presentan en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Resultados de la variación de cantidad de carga fundente para la fundición de aluminio a 750°C durante 30 minutos

| Masa inicial (g) | % Carga Fundente | %NaCl | %KCl | Masa recuperada (g) | Recuperación (%) |
|------------------|------------------|-------|------|---------------------|------------------|
| 2,0 | 0,0 | 50,0 | 50,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 0,8 | 40,0 |
| 2,0 | 300,0 | 50,0 | 50,0 | 0,5 | 25,0 |
| 2,0 | 400,0 | 50,0 | 50,0 | 0,3 | 15,0 |

Los ensayos de fundición se realizaron sin carga fundente, y con cargas fundentes de 200, 300 y 400 % en relación a la cantidad de aluminio inicial. Cantidades menores al 200 % de sales no recubren la totalidad de la muestra, por lo tanto se evaluó el comportamiento de la mezcla para porcentajes mayores.

Las láminas de aluminio tienen alta tendencia a la oxidación porque este proceso es un fenómeno superficial (Gallo, 2002, p. 8; Totten y Mackenzie, 2003, p. 119) y las láminas tienen gran área superficial. Por lo tanto el recubrimiento con sales fundentes es necesario y se demuestra en el ensayo de fundición sin sales en el cual

no se obtuvo recuperación de fase metálica, es decir todo el material se convirtió en óxido de aluminio.

En la Figura 3.11 se presenta la recuperación de fase metálica del proceso de fundición con variación de la cantidad de carga fundente.

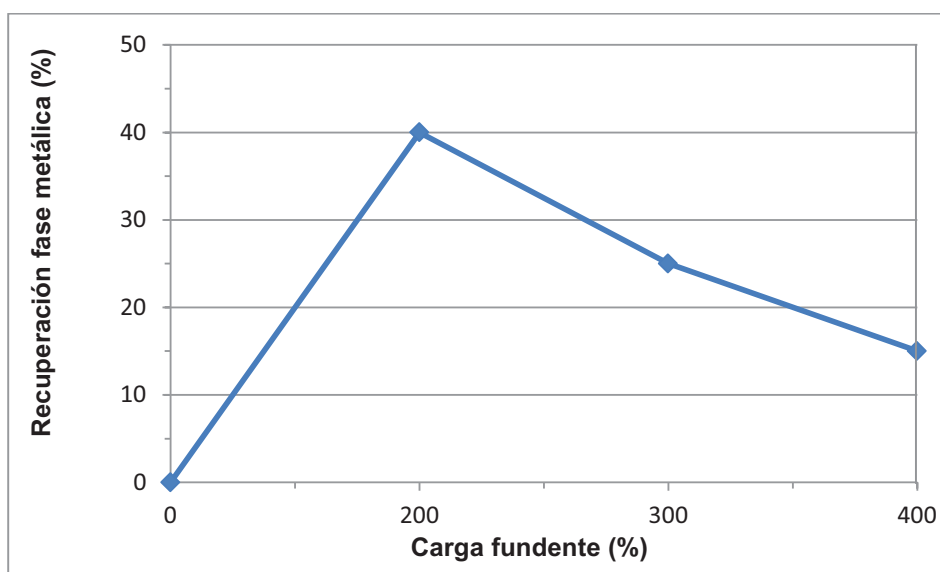


Figura 3.11 Recuperación de fase metálica en la fundición con variación del porcentaje de carga fundente con respecto al aluminio inicial para fundición, para fusión a 750°C durante 30 minutos

La mayor recuperación de fase metálica se obtiene con 200 % de sales fundentes con relación a la cantidad de material inicial compuesto por láminas de aluminio. Se puede evidenciar que el porcentaje de carga fundente que se debe añadir para la fundición de este tipo de residuo de aluminio debe ser suficiente para recubrir toda la superficie expuesta del metal.

El exceso de sales fundentes perjudica la fundición del metal bajo las condiciones de tiempo y temperatura utilizadas. Cantidades superiores a 200 % de carga fundente requieren de mayor tiempo y temperatura para su cambio de estado por lo tanto no se alcanza la fundición de las sales.

Debido a que las sales no se funden completamente, no se produce el recubrimiento del metal, por lo tanto la oxidación del material aumenta. Otra desventaja de la utilización de sales fundentes en exceso es la generación de mayor cantidad de residuos de la fundición constituidos por óxido de aluminio y por sales de cloro y flúor.

3.3.4. ENSAYOS DE ADICIÓN DE FLUORURO DE POTASIO (KF)

Se evaluaron los resultados de la adición de fluoruro de potasio (KF) a la mezcla de sales fundentes para la fundición de las láminas de aluminio bajo las mejores condiciones de tiempo, temperatura, porcentaje de carga fundente, determinadas en las secciones 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3.

Los resultados de la adición de fluoruro de potasio (KF) a la mezcla de sales fundentes se presentan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Resultados de la adición de fluoruro de potasio (KF) en la fundición de aluminio a 750°C, 30 minutos con 200 % de carga fundente

| Masa inicial (g) | % Carga Fundente | %NaCl | %KCl | %KF | Masa recuperada (g) | Recuperación (%) |
|------------------|------------------|-------|------|------|---------------------|------------------|
| 2,0 | 200,0 | 50,0 | 50,0 | 0,0 | 0,8 | 40,0 |
| 2,0 | 200,0 | 47,5 | 47,5 | 5,0 | 1,0 | 50,0 |
| 2,0 | 200,0 | 45,0 | 45,0 | 10,0 | 1,0 | 50,0 |

En la Tabla 3.13 muestra que la adición de fluoruro de potasio a la mezcla de sales fundentes compuesta por cloruros de sodio y de potasio permite mejorar la recuperación de fase metálica hasta 50 % en relación a la cantidad de láminas de aluminio.

En la Figura 3.12 se presenta gráficamente el aumento de la recuperación de fase metálica debido a la adición de fluoruro de potasio (KF)

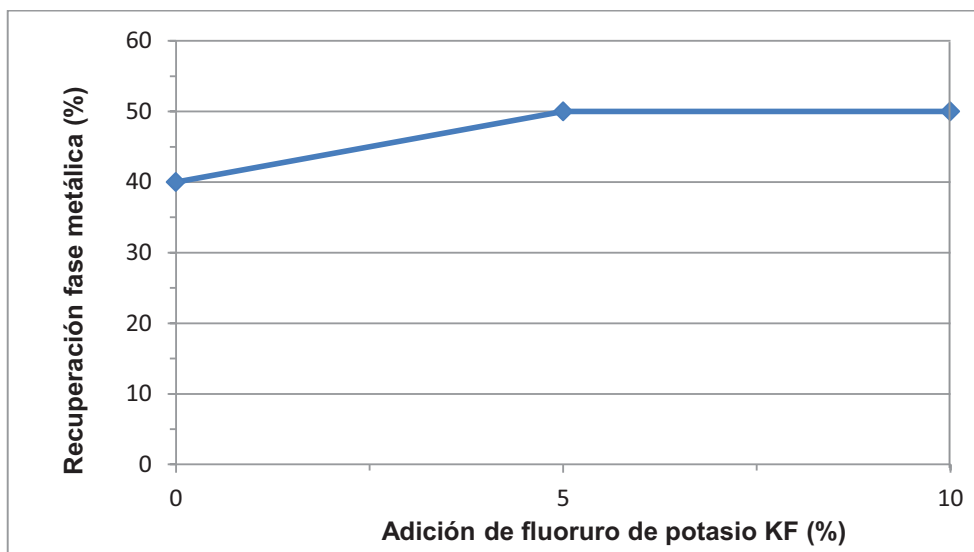


Figura 3.12 Recuperación de fase metálica de la fundición con variación de tiempo, para fusión a 750°C durante 30 minutos, 200 % de carga fundente de NaCl (50 %) y KCl (50 %)

La adición de pequeñas cantidades fluoruro de potasio (KF) permite mejorar la eficiencia del proceso de fundición. Se añadió 5 y 10 % de la sal de flúor obteniendo igual resultado en cuanto a la recuperación de aluminio.

La acción de la mezcla de sales fundentes compuesta por cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl) es el recubrimiento del metal y la composición de 50 % de cada sal permite reducir la temperatura de fundición de la mezcla.

El aumento en la recuperación de la fase metálica de la fundición de aluminio por efecto de la adición de fluoruro de potasio se debe a que esta sal influye en la tensión interfacial entre el aluminio y el recubrimiento, en la coalescencia del metal fundido y la solubilidad de la capa de óxido.

El fluoruro de potasio (KF) disminuye la tensión interfacial entre el aluminio fundido y la mezcla de sales fundentes (Totten y Mackenzie, 2003, p.128), esto mejora el recubrimiento del metal.

La adición de fluoruro de potasio (KF) también ayuda a la coalescencia de las gotas de aluminio para formar gotas de mayor tamaño y conseguir la unión de todo el material fundido en una sola fase metálica (Totten y Mackenzie, 2003, p. 129).

La capa de óxido formada alrededor de las gotas de aluminio evita el contacto de las mismas, el fluoruro de potasio (KF) actúa como solvente del óxido de aluminio depositado en la superficie de las gotas de aluminio fundido. Este efecto de la sal de flúor sobre la capa superficial de óxido facilita la unión de las gotas de aluminio (Totten y Mackenzie, 2003, p. 129).

La influencia de la sal de flúor se puede evidenciar desde cantidades mínimas añadidas a la mezcla de cloruros, se logra resultados desde la adición de 2,5 % de fluoruro de potasio (KF) (Totten y Mackenzie, 2003, p.129).

Los resultados presentados en la Tabla 3.13 se confirman de acuerdo a la información bibliográfica, y permiten determinar que la mezcla de sales fundentes que produce mayor recuperación de fase metálica está compuesta por iguales cantidades de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl) y la adición de 5 a 10 % de fluoruro de potasio (KF).

Además de mejorar la recuperación de fase metálica en la fundición de las láminas de aluminio, la adición de fluoruro de potasio (KF) a la mezcla de sales fundente mejora cualitativamente el producto metálico.

3.3.5. ENSAYOS DE FUNDICIÓN DE LÁMINAS DE ALUMINIO/POLIETILENO

Se realizaron ensayos de fundición de láminas de polietileno/aluminio para evaluar la eficacia del proceso de lixiviación del polietileno de las láminas. Las condiciones a las que se efectuaron los ensayos de fundición fueron determinadas con bases en los mejores resultados obtenidos con las láminas de aluminio.

Cada lámina de polietileno/aluminio utilizada corresponde a un envase multicapa por lo tanto la cantidad de aluminio presente en la muestra se determinó de acuerdo al porcentaje de cada capa presente en el empaque. Un envase multicapa pesa aproximadamente 28 g y contiene 75 % de papel, 20 % de polietileno y 5% de aluminio, con base en estos datos se determinó que la cantidad de aluminio que ingresa a la fundición con cada lámina de polietileno/aluminio es 1,4 g.

El porcentaje de recuperación de aluminio se calculó como la relación entre la cantidad de fase metálica obtenida de la fundición y la cantidad de aluminio presente en la muestra inicial que corresponde a 1,4 g para las láminas de 4,5 g de masa total.

Los resultados de los ensayos de fundición de láminas de polietileno/aluminio se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14 Resultados de la fundición de láminas de polietileno/aluminio a 750°C, 30 minutos con 200 % de carga fundente con respecto a aluminio a fundirse

| Material | Masa inicial (g) | %NaCl | %KCl | %KF | Masa Recuperada (g) | Recuperación (%) |
|----------|------------------|-------|------|------|---------------------|------------------|
| Al | 2,0 | 47,5 | 47,5 | 5,0 | 1,0 | 50,0 |
| PEAL | 4,5 | 50,0 | 50,0 | 0,0 | 0,2 | 14,0 |
| PEAL | 4,5 | 45,0 | 45,0 | 10,0 | 0,3 | 21,0 |
| PEAL | 4,5 | 47,5 | 47,5 | 5,0 | 0,3 | 21,0 |

También se muestra el resultado de la fundición de láminas de aluminio sin polietileno bajo las mismas condiciones para evaluar la diferencia de la fundición de material que pasó por el proceso de lixiviación.

Los resultados de la fundición de las láminas de polietileno/aluminio indican que el porcentaje de recuperación es menor al obtenido del procesamiento del material lixiviado. El valor de recuperación resultado de la fundición de láminas de aluminio puro presenta mayor cantidad de fase metálica. La relación entre los resultados de la fundición de los dos tipos de materiales es del doble de recuperación cuando se trata del aluminio que fue tratado por lixiviación.

Los ensayos de fundición del de las láminas de polietileno/aluminio obtienen mejores resultados en la recuperación con la adición de fluoruro de potasio (KF) a la mezcla de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl). En la fundición de las láminas de polietileno/aluminio se produce mayor oxidación del metal debido a que el polietileno presente en las muestras dificulta la aglomeración de la lámina dentro del crisol. Las láminas dejan regiones vacías en la que se acumula oxígeno que durante la fundición reacciona con el aluminio.

El polietileno dificulta la fundición del aluminio porque durante el proceso se mezcla con las sales fundentes produciendo un material de gran viscosidad. El aumento en la viscosidad de la mezcla de sales fundentes disminuye su efectividad en el recubrimiento de la fase metálica, además afecta la acción de los fluoruros en cuanto a su efecto para mejorar la coalescencia de las gotas de aluminio y solubilidad del óxido de aluminio.

3.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DEL ALUMINIO OBTENIDO PARA DETERMINAR SUS APLICACIONES COMERCIALES.

Se caracterizó el producto metálico obtenido de la fundición de láminas de aluminio provenientes de envases multicapa post consumo. Se realizó el análisis químico y mineralógico para determinar la pureza del aluminio final y la presencia de contaminación por otros metales

3.4.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL ALUMINIO

Los análisis químicos del producto metálico de la fundición se realizaron de acuerdo a la metodología detallada en la sección 2.4.1. La caracterización se realizó por

espectrofotometría de chispa. Además se realizó un análisis químico semicuantitativo mediante el analizador de rayos X del equipo de microscopía electrónica de barrido.

3.4.1.1. Caracterización química del aluminio mediante espectrofotometría de chispa

La técnica de caracterización química basada en la espectrofotometría de chispa presenta mejores resultados que otros tipos de análisis químico, esto debido a que permite la lectura directa del equipo en piezas metálicas, sin necesidad de desagregación de la muestra como es el caso de la espectrofotometría por absorción atómica.

La espectrofotometría de chispa es la mejor técnica de análisis para la caracterización de piezas metálicas. Para obtener mejores resultados del equipo de espectrofotometría de chispa fue necesario obtener una superficie completamente plana y lisa de aluminio, con esto se evitó lecturas erróneas.

Los resultados de la espectrofotometría de chispa realizada al producto metálico de la fundición de láminas de aluminio obtenidas de los envases multicapa se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Análisis químico mediante espectrofotometría de chispa del producto metálico de la fundición de láminas de aluminio provenientes de envases multicapa post consumo.

| Elemento | Porcentaje (%) | Elemento | Porcentaje (%) |
|----------|----------------|----------|----------------|
| Al | 97,85 | Zn | 0,01 |
| Si | 1,06 | Co | 0,00 |
| Fe | 0,97 | V | 0,01 |
| Cu | 0,00 | Pb | 0,04 |
| Mn | 0,00 | Sn | 0,00 |
| Mg | 0,00 | Sb | 0,00 |
| Ni | 0,00 | Cr | 0,00 |

El proceso de fusión de las láminas de aluminio provenientes de los envases multicapa permite obtener un producto metálico compuesto principalmente por aluminio con un porcentaje de 97,8 %.

El porcentaje de presencia de aluminio en la muestra aumenta con respecto al porcentaje de aluminio contenido en las láminas metálicas obtenidas del proceso de lixiviación que es de 96,6 %, por lo tanto se puede determinar que la fundición aumenta la pureza del aluminio.

Los elementos que constituyen la impureza del producto final y se encuentran en mayor cantidad son silicio y hierro. Esta tipo de impureza se presenta en los datos bibliográficos de la Tabla 1.6 de la sección 1.2.3.3, correspondiente al análisis químico de aluminio obtenido de envases multicapa por la técnica de plasma térmico y también en los datos experimentales presentados en la Tabla 3.9 de la sección 3.2.2 que corresponde al análisis químico mediante espectrofotometría de chispa a las láminas metálicas luego del proceso de lixiviación.

El silicio y hierro contenido en el producto metálico de la fundición es menor que la cantidad de estos metales presente en las láminas analizadas antes de la fusión, por lo tanto se demuestra la efectividad del proceso térmico para la disminución de impurezas metálicas.

Existen impurezas de otros metales en menor concentración que no se presentan en cantidades significativas dentro del producto metálico final. Estas impurezas también son reducidas por efecto de la fusión, la cantidad de estos elementos metálicos es menor en el material fundido con respecto a las láminas de aluminio analizadas luego de la lixiviación.

Los resultados del análisis químico del producto de la fundición por el método de espectrofotometría chispa presenta el máximo valor de porcentaje de aluminio, este

porcentaje de pureza se utilizó como base para el diseño de la planta y para determinar la calidad del producto final del proceso.

3.4.1.2. Caracterización química del aluminio mediante analizador de rayos X de microscopio electrónico

Se analizó la muestra a 200 y 3 000 aumentos para evaluar la superficie del material fundido.

En las regiones analizadas por microscopía se determinó la composición mediante análisis semicuantitativo y los resultados se presentan en el Anexo VII

En la Figura 3.13 se presenta una fotografía tomada con microscopio electrónico a 200 aumentos. La región de aluminio fundido evaluada, presenta grietas en las que se pueden acumular impurezas.

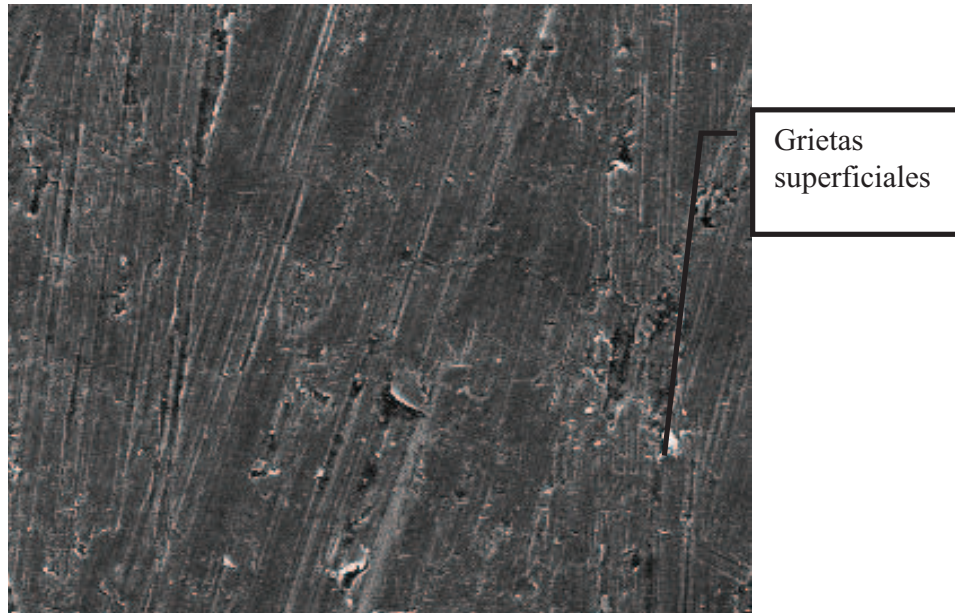


Figura 3.13 Fotografía tomada por microscopía electrónica a 200 aumentos de la muestra de aluminio fundido

El análisis semicuantitativo de la región de la muestra analizada se muestra en la Tabla 3.16

Tabla 3.16 Composición de la región de aluminio fundido, analizada a 200 aumentos

| Elemento | Porcentaje en peso (%) |
|----------|------------------------|
| Al | 96,6 |

El aluminio es el elemento mayoritario en el análisis semicuantitativo, En la composición se indica la presencia de oxígeno que se debe a restos de Al_2O_3

En la Figura 3.14 se presenta una fotografía de la muestra de aluminio fundido a 3000 aumentos. Se puede observar la presencia de una región de impurezas

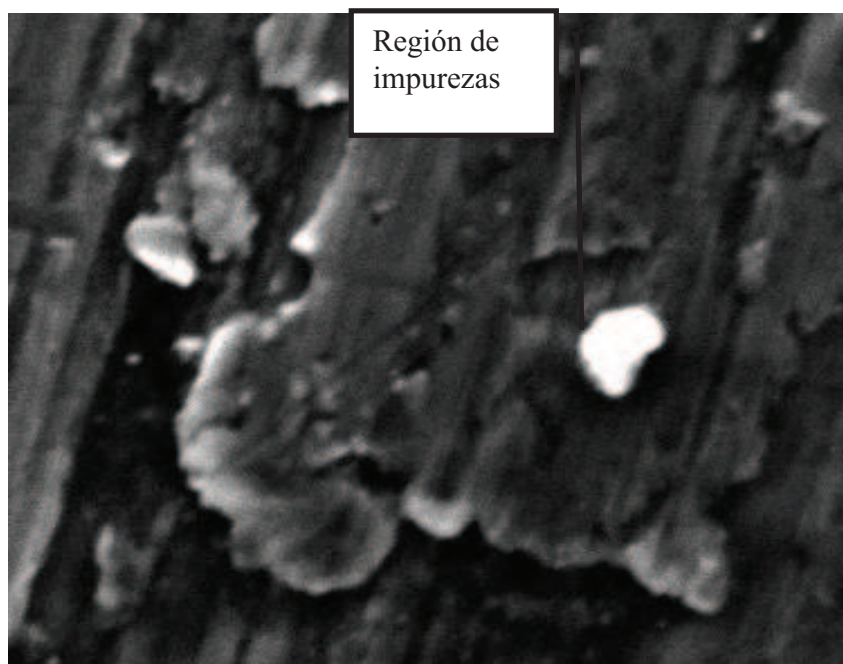


Figura 3.14 Fotografía tomada por microscopía electrónica a 3000 aumentos de la muestra de aluminio fundido

El análisis semicuantitativo de una pequeña grieta en la que se acumula impurezas, evaluada a 3000 aumentos, presenta la composición presentada en la Tabla 3.17

Tabla 3.17 Composición de la región de aluminio fundido, analizada a 3000x

| Elemento | Porcentaje en peso (%) | Elemento | Porcentaje en peso (%) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Al | 56,1 | K | 8,0 |
| Cl | 14,8 | Pb | 4,3 |
| Na | 10,4 | Si | 3,0 |

La presencia de impurezas se debe a acumulación de restos de sales fundentes en las pequeñas grietas superficiales de la muestra de aluminio.

3.4.2. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL ALUMINIO

El análisis mineralógico del producto de la fundición se realizó de acuerdo a la metodología detallada en la sección 2.4.2. La caracterización se realizó por difracción de rayos X.

La caracterización mineralógica mediante difracción de rayos X permitió determinar que la muestra de aluminio fundida tiene 100 % de aluminio como elemento, no existe presencia de otros compuestos. El equipo de difracción de rayos X utilizado tiene precisión de 1 % por lo tanto no detecta elementos o compuestos con porcentajes menores a ese valor.

El resultado de la difracción de rayos X de la muestra de aluminio fundido complementa al ensayo de análisis químico por espectrofotometría de chispa para determinar que el componente mayoritario del producto es aluminio y que el porcentaje de impureza es mínimo.

En la Figura 3.15 se presenta el difractograma correspondiente al análisis del producto de la fundición, en el Anexo VIII se muestra el difractograma en mayor tamaño.

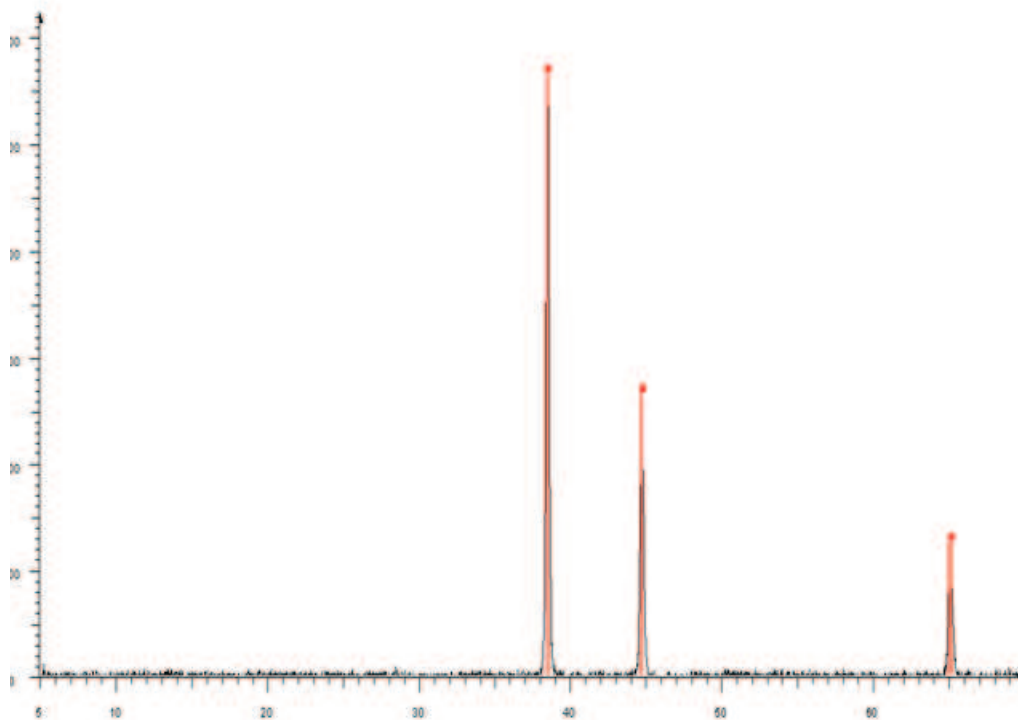


Figura 3.15 Difractograma de de la muestra de aluminio fundido.

3.5. DETERMINACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS.

El diagrama de flujo del proceso y el dimensionamiento de los equipos necesarios para la operación de la planta de recuperación de aluminio de los envases multicapa se realizó con base en los datos experimentales presentados en las secciones 3.1, 3.2, 3.3, y 3.4, y en datos detallados en la revisión bibliográfica.

La capacidad de la planta se estableció de acuerdo a; plantas de reciclaje similares de hasta 1 000 t de envases por mes (Neves, 2005, p.2), y a datos sobre la generación de desechos provenientes de envases multicapa en Ecuador (Abarca y Muñoz, 2012, p. 119).

Se analizó el tratamiento de 200 t por mes, para una operación mensual de 20 días de 8 horas de trabajo y se determinó el procesamiento diario de 10 000 kg de envases multicapa, que corresponde a la cantidad necesaria para cumplir con la capacidad de la planta de 200 t de envases por mes. En la Tabla 3.18 se presenta el tiempo de operación de cada proceso involucrado en la separación de capas de los envases.

Tabla 3.18 Tiempo de operación en cada proceso

| Operación | Tiempo (h) |
|----------------------------|-------------------|
| Desagregación | 8,0 |
| Lixiviación | 7,5 |
| Fundición | 1,0 |
| Tamizado de pulpa de papel | 8,0 |
| Tamizado de láminas PEAl | 8,0 |
| Recuperación de solvente | 7,5 |

Los tiempos de operación se planificaron de acuerdo a la capacidad de la planta para procesar 10 000 kg de material por día. La desagregación se opera por lotes y el procesamiento de cada lote tiene un tiempo de 30 minutos de acuerdo a los resultados de la Tabla 3.3. Se planificó procesar 8 cargas de material por día lo que corresponde a 4 horas de trabajo, pero al tratarse de gran cantidad de material las operaciones de carga y descarga del material también consumen tiempo de la operación en general por lo tanto se estimó para la desagregación 8 horas de trabajo. La lixiviación también es una operación por lotes, los cuales tienen un tiempo de procesamiento de 90 minutos según se detalla en la Tabla 3.5 para obtener la mayor pérdida de masa en el menor tiempo. La planificación para la lixiviación se determinó para 5 cargas de material por lo tanto la operación total tiene un tiempo de 7 horas y 30 minutos.

La fundición se opera por lotes, se trabaja con una carga diaria con un tiempo de duración de 1 hora. Aunque los resultados presentados en la Tabla 3.14 indican que el mejor tiempo para la fundición es 30 minutos, al tratarse de mayor cantidad de material el que se procesa se estimó un aumento del tiempo de fundición.

Los tres principales procesos operan por lotes por lo tanto es necesario mantener un stock de material en cada etapa de proceso de por lo menos un día de trabajo para poder mantener la operación diaria de acuerdo a la planificación de la operación de cada etapa. También se tiene operaciones complementarias de tamizado para la recuperación y recirculación de agua, y de recuperación de solvente en la etapa de lixiviación. Los procesos de tamizado tanto de la pulpa de papel como de las láminas de polietileno/aluminio se realizan por lotes de acuerdo a la operación de la desagregación por lo tanto se alimentan 8 cargas de material para la separación por tamizado. Cada carga debe procesarse durante 30 minutos. La recuperación de solvente se determinó para una operación paralela a la lixiviación de manera que también se realiza por lotes. El tiempo de procesamiento de cada carga de solvente es de 1 hora y 30 minutos.

3.5.1. DETERMINACIÓN DE DIAGRAMA DE FLUJO

Se determinó el diagrama de flujo para la recuperación de aluminio a partir de envases multicapa post consumo, de acuerdo a los criterios detallados en la sección 2.5.1, y con base en los resultados obtenidos en las secciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4. Se realizaron dos diagramas de flujo, para determinar la importancia de la etapa de lixiviación en el proceso, se determinó un diagrama de flujo que incluye la lixiviación y otro diagrama de flujo en el cual se elimina esta operación. Se desarrolló balance de masa en cada etapa del proceso y en general de toda la planta.

3.5.1.1. Diagrama de flujo del proceso con etapa de lixiviación

En la Figura 3.16 se presenta el diagrama de flujo del proceso que incluye la etapa de lixiviación para separar las láminas de polietileno. También se muestra el balance

de masa de cada etapa con el detalle de composición y cantidad de material que se procesa.

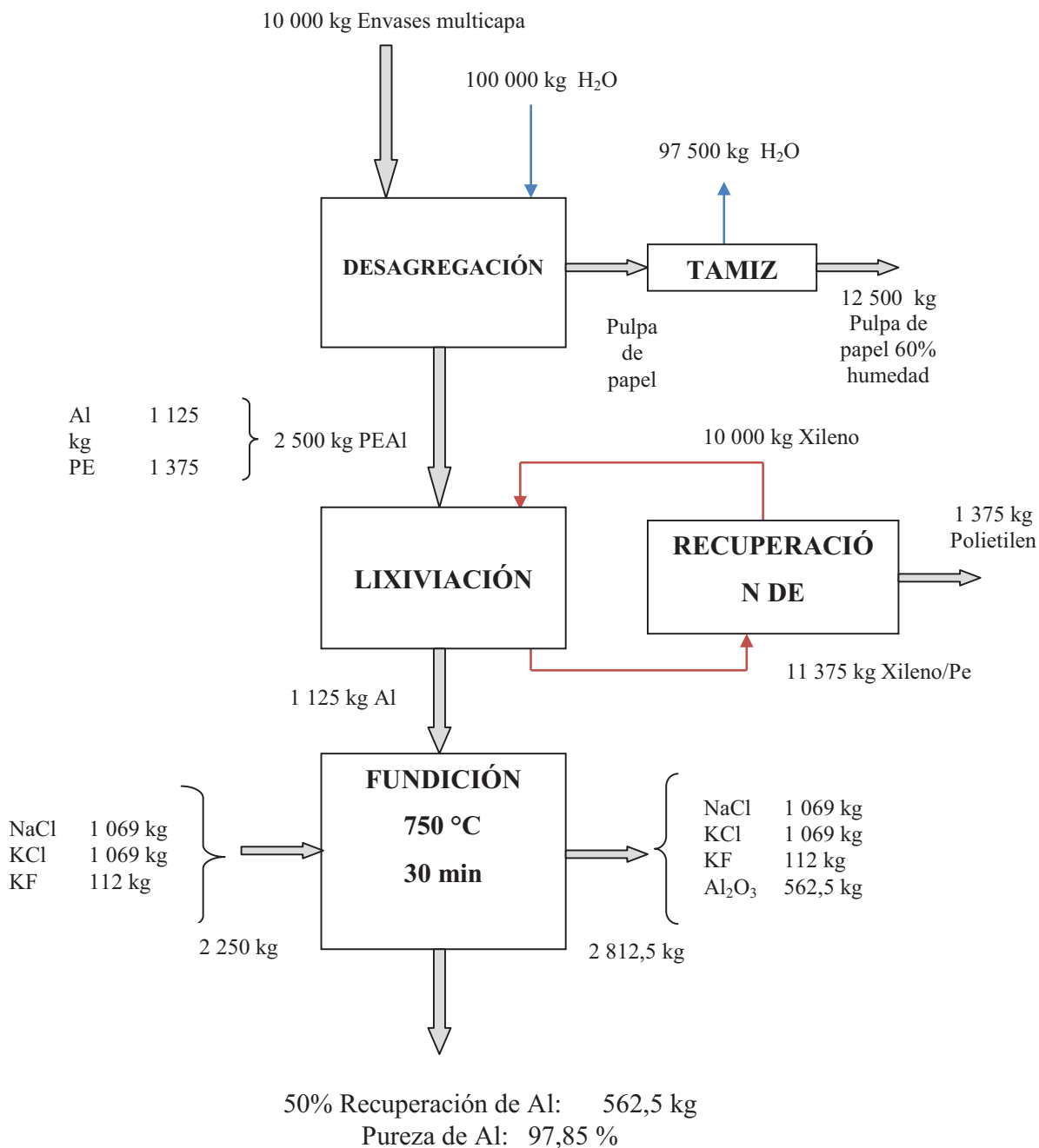


Figura 3.16 Diagrama de flujo y balance de masa para una planta de recuperación de aluminio a partir de envases multicapa con una capacidad de 10 t diarias, con lixiviación de polietileno con xileno

En el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.16 se presentan las etapas necesarias para la separación de los diferentes componentes de los envases multicapa de acuerdo a la experimentación de la sección 2. Las principales operaciones del proceso son: desagregación, lixiviación y fundición. También se requiere de operaciones secundarias como separación por tamizado y recuperación del solvente utilizado en la lixiviación.

En el proceso de desagregación se separa la pulpa de papel del material compuesto por polietileno y aluminio. Se procesa 10 000 t de envases por día, que constituye el 10 % de la alimentación, por lo tanto se debe añadir 100 000 kg de agua, esta cantidad agua corresponde a la necesaria para un día de operación, que se reemplaza con la recirculación del agua de proceso. La materia prima se procesa y se obtienen dos productos, uno correspondiente al 25 % del material inicial constituido por polietileno/aluminio, y otro producto formado por pulpa de papel que representa el 75 % de la carga de envases multicapa. La separación mediante desagregación se realiza por lotes

El material desagregado que contiene la pulpa de papel es tamizado para separar la pulpa sólida del agua. El agua se recircula al proceso de desagregación y la pulpa con 60 % de humedad constituye uno de los productos del proceso de reciclaje de los envases multicapa. La cantidad de agua que recircula del proceso es 97 500 kg, el resto del agua está contenida en la pulpa de papel húmeda.

El material desagregado compuesto por polietileno y aluminio también pasa por un proceso de tamizado para separar el agua superficial del material sólido. De esta manera se obtiene un producto que puede ser tratado por lixiviación con solventes orgánicos. El agua que se recupera mediante este proceso se recircula a la desagregación. La cantidad que se obtiene es 5 000 kg de agua por día y el producto sólido de polietileno y aluminio alcanza una cantidad de 2 500 kg, de los cuales 1 375 kg corresponden a polietileno y 1 125 kg a aluminio

A la etapa de lixiviación ingresa 2 500 kg de material compuesto por polietileno/aluminio, en este proceso se disuelve el polietileno con xileno y se obtiene como producto 1 125 kg de aluminio. El polietileno y xileno que se obtienen como subproducto se envían a una etapa de recuperación de solvente, de la cual se obtiene solvente para recirculación en la lixiviación y polietileno contaminado con xileno, este polietileno puede ser considerado como residuo o procesado para obtener polietileno comercial.

La última etapa del proceso de recuperación de aluminio, corresponde a la fundición de las láminas de aluminio que han sido separadas de las capas de cartón y polietileno de los envases multicapa. La carga para la fundición es de 1 125 kg de aluminio proveniente de la lixiviación. Se añade 2 250 kg de sales fundentes para evitar la oxidación del aluminio. La fundición se realiza a 750°C, durante 30 minutos, estas condiciones son las que generaron mejores resultados en la experimentación de la sección 3.3.

El producto de la fundición es 562,5 kg de aluminio, lo que corresponde al 50 % de la carga inicial. La oxidación se puede disminuir, pero no evitar por completo por esta razón la recuperación no alcanza valores altos. El grado de pureza del aluminio que se obtiene del proceso es de 97,85 %, de acuerdo a la experimentación.

3.5.1.2. Diagrama de flujo del proceso sin la etapa de lixiviación.

En la Figura 3.17 se presenta el diagrama de flujo del proceso, sin incluir la etapa de separación de la lámina de polietileno. Este diagrama permite analizar la importancia de la lixiviación en la recuperación de fase metálica de la fundición y la posibilidad de evitar esta etapa. También se muestra el balance de masa de cada etapa con el detalle de composición y cantidad de material que se procesa.

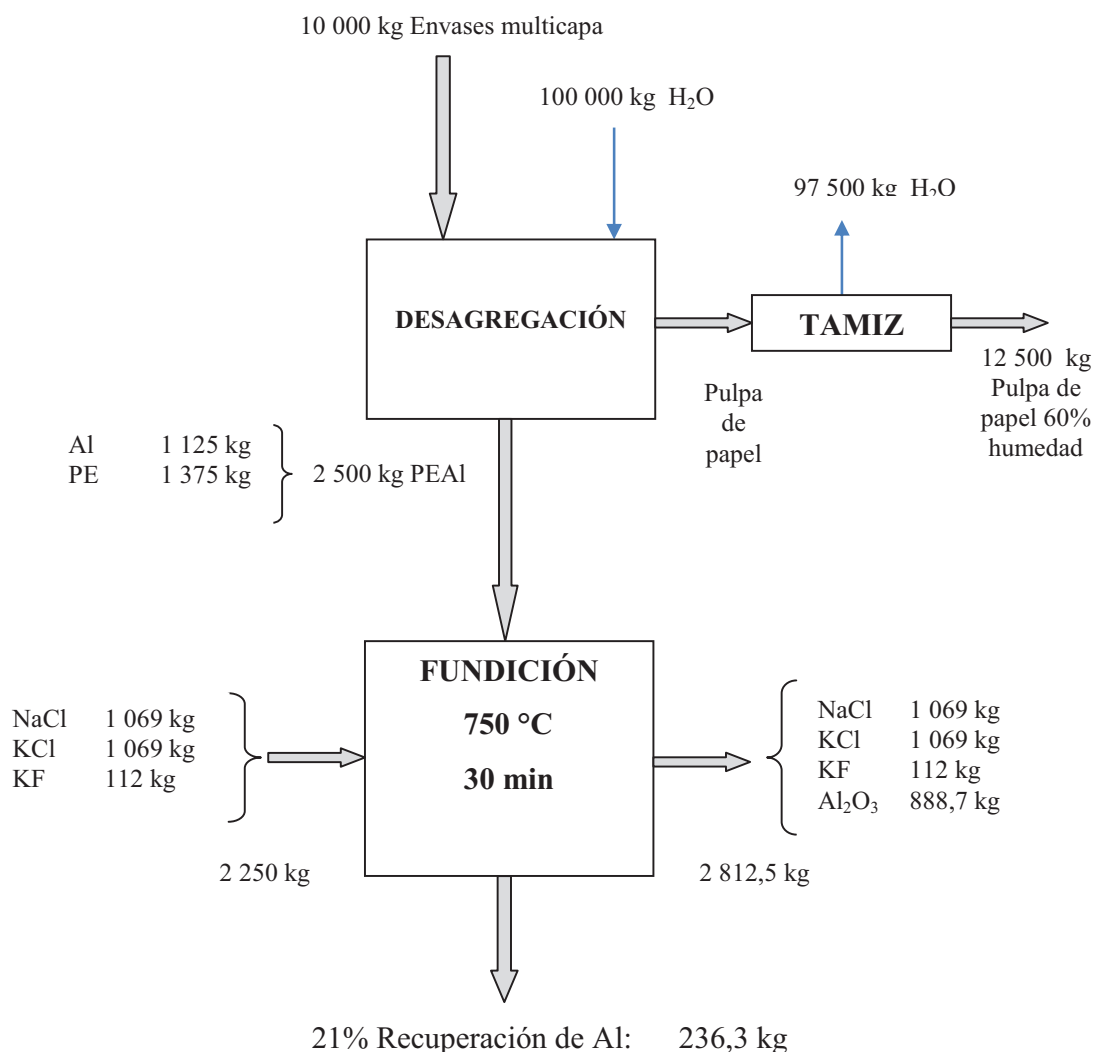


Figura 3.17 Diagrama de flujo y balance de masa para una planta de recuperación de aluminio a partir de envases multicapa con una capacidad de 10 t diarias, sin lixiviación de polietileno

En el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.17 se presentan las etapas necesarias para la separación de la capa de cartón de los envases multicapa de acuerdo a la experimentación de la sección 2. Las principales operaciones del proceso son: desagregación, y fundición. También se requiere de operaciones secundarias como separación por tamizado. Los procesos de desagregación y tamizado que permiten la separación de la lámina de cartón y recuperación de agua de proceso, son similares a los procesos presentados en la sección 3.5.1.1.

La última etapa del proceso de recuperación de aluminio, corresponde a la fundición de las láminas de aluminio que han sido separadas de la capas de cartón de los envases multicapa.

La carga para la fundición es de 2 500 kg de material compuesto por polietileno/aluminio proveniente de la desagregación. Para la fundición se añade 2 250 kg de sales fundentes con el objetivo de evitar la oxidación del aluminio. La fundición se realiza a 750°C, durante 30 minutos, estas condiciones son las que generaron mejores resultados en la experimentación de la sección 3.3.

El producto de la fundición es 236,3 kg de aluminio, lo que corresponde al 21 % de la carga inicial de polietileno/aluminio. La oxidación de aluminio en este proceso es mayor que la que se generó y presentó en la sección 3.5.1.1.

La Figura 3.17, permite determinar las diferencias entre el proceso de recuperación de aluminio mediante la separación de todas las capas de los envases con el proceso que solo involucra la separación de la lámina de cartón y la posterior fundición del material compuesto de polietileno/aluminio.

La recuperación de aluminio disminuye al no realizarse la etapa de lixiviación ya que la capa de polietileno favorece la oxidación durante la fusión del metal. La comparación de los resultados de recuperación de aluminio metálico mediante los procesos detallados en los diagramas de flujo de la Figura 3.16 y Figura 3.17 determinó que el proceso con el que se obtiene mayor cantidad de aluminio es el que incluye etapa de lixiviación.

3.5.2. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

Se dimensionaron los equipos necesarios para la instalación de una planta de recuperación de aluminio de envases multicapa post consumo. La necesidad de

equipos y sus dimensiones se determinaron con base en los resultados experimentales y en los diagramas de flujo presentados en la Figura 3.16 y Figura 3.17 respectivamente para cada proceso.

Las características de los equipos seleccionados se presentan en el Anexo III.

3.5.2.1. Dimensionamiento de tanque desagregador

Para la determinación de la capacidad del tanque desagregador, se tomó en cuenta la cantidad de envases en el proceso y la cantidad de agua necesaria para generar el ingreso de material con 10 % de sólidos. Además el criterio de mayor consideración para la elección del tanque desagregador fue la capacidad de producción

Con base en la corriente de alimentación al proceso de desagregación de la Figura 3.16, se obtiene la capacidad necesaria de producción del tanque de desagregación. Los cálculos para la determinación del volumen del tanque se presentan a continuación.

$$\frac{110\,000,0\text{ kg}}{d} * \frac{d}{8,0\text{ h}} = 13\,750,0 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

De los 13 750 kg/h que se requiere procesar, el 10% corresponde a envases multicapa y el 90 % corresponde a agua, por lo tanto se tiene 1 370 kg de envases y 12 375 kg de agua.

La densidad el agua se asume 1 kg/L. La densidad del papel, principal componente de los envases, es de 71,5 kg/m³ de acuerdo a datos de la Agencia de residuos de Catalunya (2010) (p. 1).

$$12\,375,0 * \frac{m^3}{1,0 \times 10^{-3} \text{ kg}} = 12,4 \text{ m}^3 \text{ Agua}$$

$$1\,375,0 \text{ kg} * \frac{m^3}{71,5 \text{ kg}} = 19,2 \text{ m}^3$$

El volumen total del tanque desagregador es de 31,6 m³. Para la determinación de las dimensiones de radio y altura del tanque se utilizó la Ecuación 3.1.

$$V = \pi * r^2 * h \quad [3.1]$$

Donde

V= volumen del tanque

r= radio del tanque

h= altura del tanque

Para un volumen de 31,6 m³ y diámetro de 4 m, la altura que debe tener el tanque es de 2,5 m.

En la Tabla 3.19 se presentan las dimensiones que debe tener el tanque de desagregación de acuerdo a cálculos de volumen del material que se procesa.

Tabla 3.19 Dimensionamiento del tanque desagregador

| Volumen de diseño (m ³) | Diámetro (m) | Altura (m) |
|---|-------------------|-----------------|
| 31,8 | 4,0 | 2,5 |

Con base en las dimensiones del tanque desagregador presentadas en la Tabla 3.19, se buscó equipos que cumplan con dichas características.

En la Tabla 3.20 se indican las dimensiones del tanque desagregador elegido para el proceso. En el Anexo III se presenta el catálogo del equipo.

Tabla 3.20 Características del tanque desagregador

| Volumen (m ³) | Diámetro (m) | Altura (m) | Capacidad de producción (t/día) | Potencia (kw) |
|---------------------------|--------------|------------|----------------------------------|---------------|
| 40,0 | 4,0 | 2,5 | 300-370 | 255 |

Las características del tanque desagregador no incluyen dimensiones como diámetro y altura el tanque, pero se ajusta al volumen requerido, por lo tanto se selecciona el tanque y se asume las dimensiones calculadas y presentadas en la Tabla 3.19.

3.5.2.2. Dimensionamiento de tanque de lixiviación

El tanque para el proceso de lixiviación que se requiere, es un tanque con calentamiento eléctrico, esta condición mejora la acción del solvente en la disolución del polietileno contenido en las láminas provenientes de la desagregación.

Para el material del tanque se seleccionó acero inoxidable, debido a que se opera con solventes que pueden causar corrosión.

Se determino que la cantidad de tanques para lixiviación es dos. Esto se debe a que el proceso de lixiviación se realiza por lotes, y es necesario planificar la producción con tiempos de enfriamiento y calentamiento del equipo.

La capacidad de los tanques de lixiviación se determinó con base en los datos presentados en el diagrama de flujo de la Figura 3.16. Cada lote de lixiviación requiere procesar 500 kg de polietileno/aluminio y 2 500 kg de xileno.

$$2\,500,0 \text{ kg Xileno} * \frac{L}{0,9 \text{ kg}} = 2\,777,7 \text{ L Xileno}$$

$$500 \text{ kg polietileno/aluminio} * \frac{L}{1,7 \text{ kg}} = 292,4 \text{ L polietileno/aluminio}$$

El volumen total del tanque desagregador es de $3,1 \text{ m}^3$. Para la determinación de las dimensiones de radio y altura del tanque se utilizó la Ecuación 3.1. Para un volumen de $3,1 \text{ m}^3$ y diámetro de $0,8 \text{ m}$, la altura que debe tener el tanque es de $1,1 \text{ m}$. En la Tabla 3.21 se presenta el dimensionamiento del equipo necesario para el proceso de lixiviación de polietileno

Tabla 3.21 Dimensionamiento de tanque de lixiviación

| Volumen (m^3) | Diámetro (m) | Altura (m) |
|-----------------------------|-----------------|---------------|
| 3,1 | 1,6 | 1,6 |

Con base en la determinación de dimensiones de los tanques de lixiviación, se escogieron los equipos que cumplen con las características indicadas en la Tabla 3.21. En la Tabla 3.22 se presentan los datos correspondientes a las dimensiones de los tanques, de acuerdo al catálogo presentado en el Anexo III

Tabla 3.22 Características de tanques de lixiviación

| Volumen (m^3) | Diámetro (m) | Altura (m) | Potencia (kw) |
|-----------------------------|-----------------|---------------|------------------|
| 3,2 | 1,2 | 3,0 | 1,5 |

3.5.2.3. Dimensionamiento de horno eléctrico

La selección del tipo de equipo para realizar el proceso de fusión del material se realizó con base en los resultados experimentales de la sección 3.3 y en los datos presentados en la Figura 3.16 y en la Figura 3.17 correspondientes a los diagramas de flujo de los procesos.

Para la fundición se determinó que el equipo más adecuado es un horno eléctrico. La capacidad del horno debe cumplir con los requerimientos de los diagramas de flujo, por lo tanto se dimensionó un horno de capacidad de $562,5 \text{ kg}$ de material por carga.

El horno eléctrico de inducción se seleccionó de catálogo de acuerdo las condiciones requeridas para el procesamiento del material a fundirse.

En la Tabla 3.23 se presentan las características del horno seleccionado y la información completa del catálogo se presenta en el Anexo III.

Tabla 3.23 Características del horno eléctrico

| Capacidad (kg/d) | Potencia (kW) | Consumo de Energía (kWh/t) |
|---------------------|------------------|-------------------------------|
| 750,0 | 450,0 | 600,0 |

La capacidad del horno permite fundir una carga diaria de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 3.16, y una carga cada dos días si se selecciona la planta sin etaoa de lixiviación. Es decir que se tiene la posibilidad de operar con material lixiviado o directamente con el material proveniente de la desagregación.

3.5.2.4. Dimensionamiento de tamiz

El tamiz necesario para la separación de la pulpa de papel y el agua que se recirculará, se seleccionó de acuerdo a la cantidad de material proveniente de la desagregación. La cantidad de material que se tiene que procesar en el equipo es de 107 500 kg por día.

Para cumplir con el requerimiento de tamizado se seleccionó dos equipos de capacidad 75 000 kg por día. De acuerdo a datos de catálogo de Anexo III, se presentan las características del tamiz seleccionado en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24 Características de tamiz

| Capacidad (kg/d) | Área (m ²) | Potencia (kW) |
|---------------------|---------------------------|------------------|
| 75,0 | 3,0 | 4,0 |

3.5.2.5. Dimensionamiento de equipo de destilación.

El equipo que se dimensionó para la recuperación del solvente, que se genera como residuo de la etapa de lixiviación, es un sistema de destilación. La destilación se realizara por lotes. La composición de 2 275 kg de residuo de lixivaciones 2 000 kg de solvente y 275 kg de polietileno.

Para la recuperación de solvente se determinó la utilización de dos sistemas de destilación de solvente con capacidad para 1 500 L. Entre los dos destiladores se tendrá una capacidad de 3 000 L.

En la Tabla 3.25 se presentan las características del sistema de destilación seleccionado de catálogo comercial del Anexo III.

Tabla 3.25 Características del equipo de destilación para recuperación de solvente

| Volumen del tanque (L) | Volumen de la torre (L) | Altura de torre (m) | Diámetro de torre (m) |
|---------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| 1 500,0 | 3 200,0 | 7,5 | 0,8 |

Los valores presentados en la Tabla 3.25 corresponden a las dimensiones de un equipo de lixiviación. El volumen total de procesamiento de solvente para su recirculación, es de 3 000 L.

3.5.2.6. Distribución de equipos en planta.

De acuerdo con el requerimiento de equipos para la recuperación de aluminio de envases multicapa, se diseño la distribución de los mismo dentro de la planta.

Además se estableció la ubicación de la planta dentro del terreno y las vías de movimiento de la carga que ingresa y sale de las instalaciones.

En la Figura 3.18 se presenta la vista superior de la distribución de los principales equipo de la planta. Se especifica el dimensionamiento de cada elemento, incluyendo las zonas de almacenamiento de materia prima, y de los productos; pulpa de papel y aluminio.

La infraestructura de la planta cuenta con dos puertas de ingreso y salida. Una de las puertas se dimensionó para que permita el flujo de materiales y equipos, la otra puerta de la planta se utilizará para la zona administrativa y el ingreso y salida de persona.

La distribución de equipos se realizó de manera que las instalaciones necesarias para cada etapa del proceso se encuentren cercanas, por lo tanto se encuentran áreas específicas para la desagregación, lixiviación y fundición respectivamente.

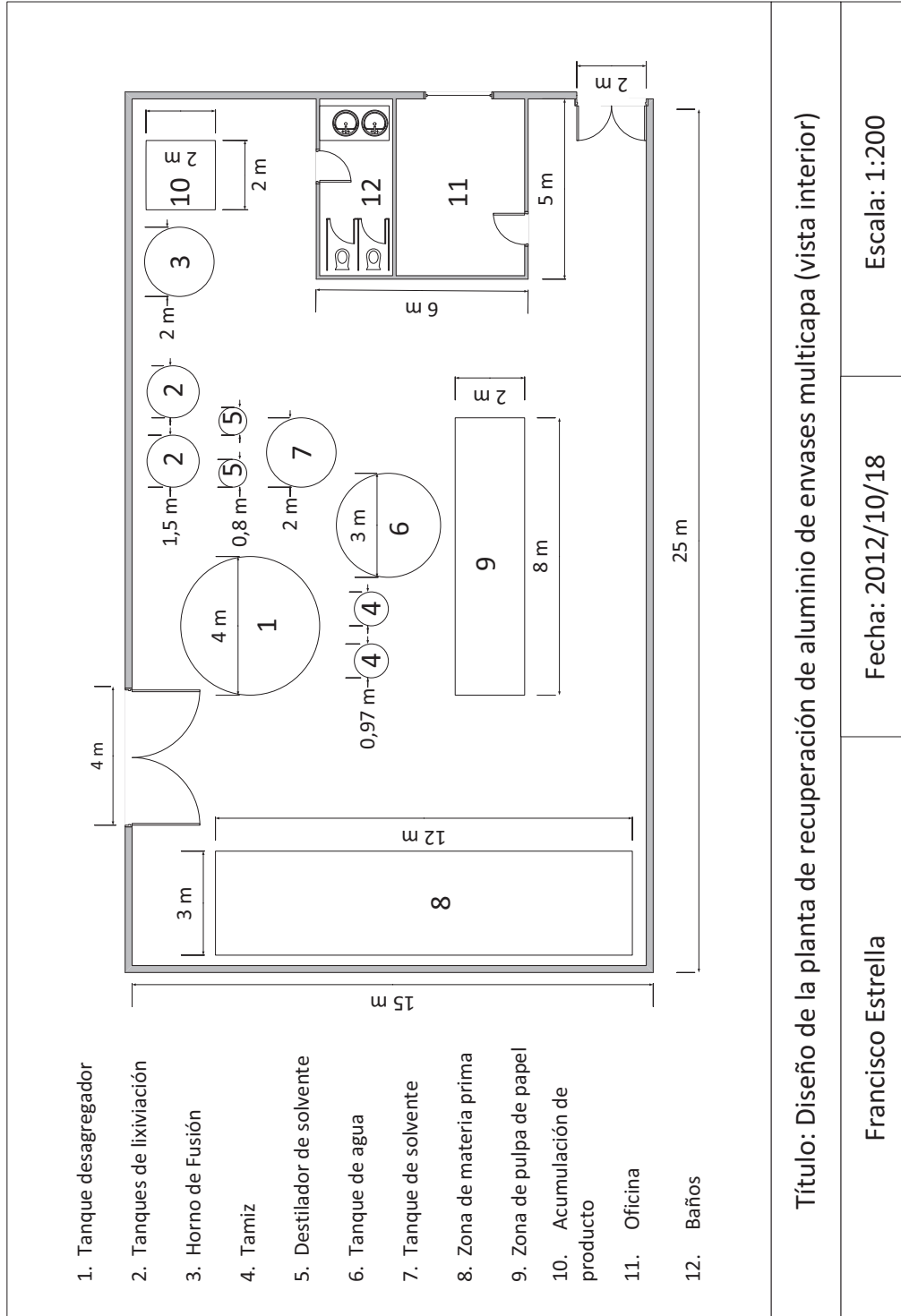


Figura 3.18 Vista superior de la distribución de equipos en el interior de la planta

El área necesaria para la distribución de los equipos, las zonas de almacenamiento y oficina administrativa es de 375,0 m², sin tomar en cuenta el área necesaria para parqueaderos y zonas de circulación de vehículos de carga.

La Figura 3.19 muestra la ubicación de la infraestructura de la planta dentro del terreno, las zonas de parqueadero y de ingreso y salida de carga.

Se muestra la zona de circulación de vehículos de carga con puertas de ingreso y salida exclusivas para el transporte de materiales. La planta cuenta con una puerta para ingreso y salida de vehículos livianos.

Se presentan las dimensiones del terreno que se requiere para la instalación de la planta y el área en la que se dimensionó es de 740,0 m².

Las dimensiones presentadas en cada equipo y en las paredes de la planta se encuentran en escala 1:200.

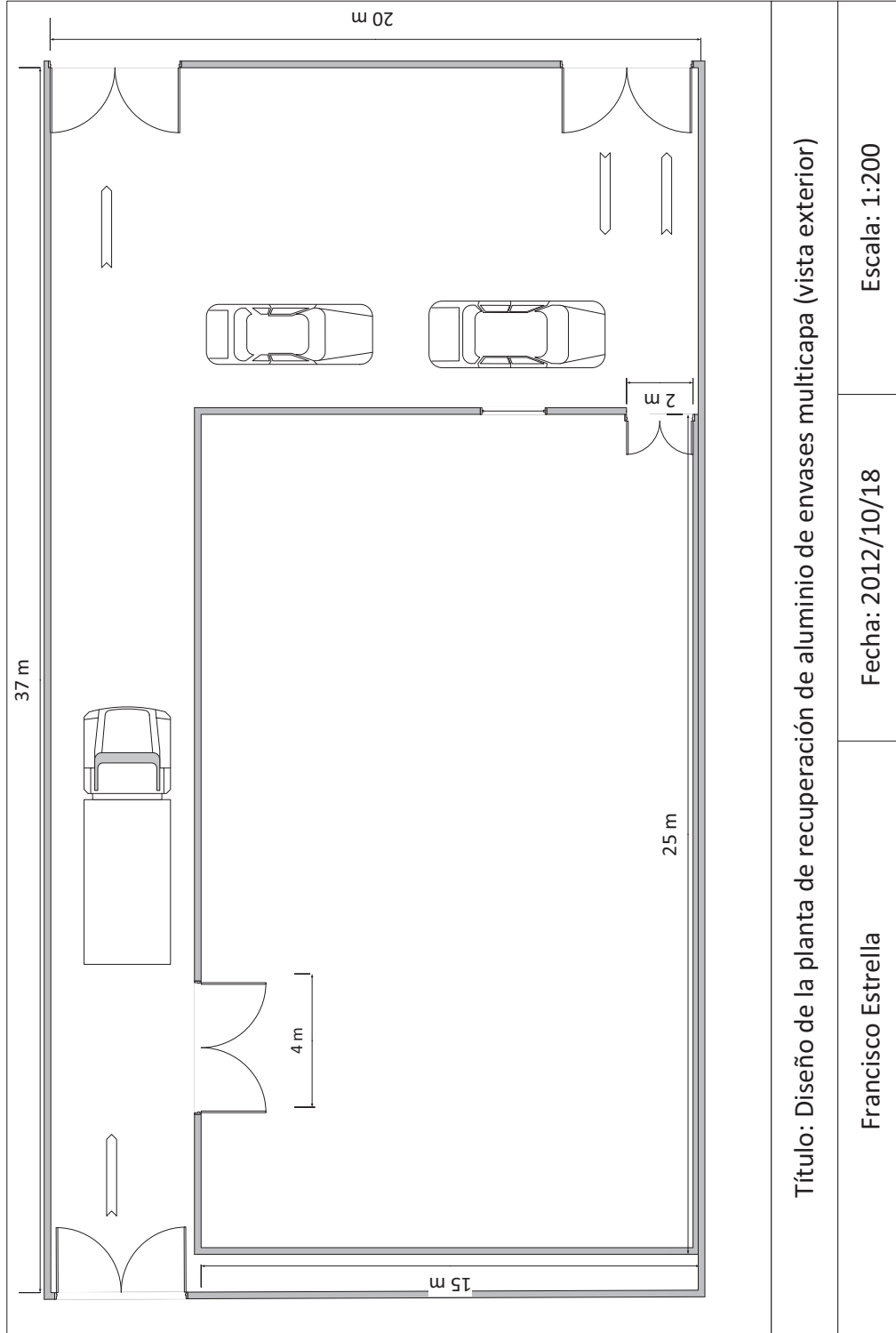


Figura 3.19 Vista superior del dimensionamiento exterior de la planta

3.6. ESTUDIO DE PRE FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA CON CAPACIDAD DE 200 t DE ENVASES MULTICAPA POR MES.

Se realizó análisis económico del proyecto para determinar la factibilidad de la instalación de la planta de recuperación de aluminio. La capacidad de procesamiento de materia prima es de 200 t/mes.

Los costos del terreno y de los equipos principales requeridos se obtuvieron con base en las características presentadas en la sección 3.5, y de acuerdo a la disponibilidad y valor comercial. Los valores de costos fijos y variables se determinaron con base en los datos presentados en los diagramas de flujo de las Figuras 3.16 y 3.17, y en la planificación de la operación de los equipos que se muestra en la Tabla 3.18.

Para el análisis económico se desprecia el costo de materia prima, ya que se espera obtener de campañas de reciclaje en las que solo se agregue costo de transporte del material.

3.6.1. COSTO DE TERRENO E INFRAESTRUCTURA

El terreno que se requiere para la instalación de la planta de recuperación de aluminio tiene un área de 740 m² y el área de construcción es de 375 m² de acuerdo al dimensionamiento presentando en la sección 3.5.

La ubicación de la planta no tiene mayor importancia, ya que no se tiene ningún requerimiento especial. Aunque la cercanía a la ciudad, en este caso Quito, influye en costos de transporte de la materia prima, por lo tanto se seleccionara un terreno en un sector aledaño a la ciudad de acuerdo a la regulación municipal.

En la Tabla 3.26 se presentan los costos del terreno y la infraestructura para la planta de recuperación de aluminio. Los costos son aproximados ya que dependen de la ubicación del terreno de acuerdo a la plusvalía al momento del desarrollo del proyecto.

Tabla 3.26 Costos de terreno e infraestructura

| Elemento | Costo por m² (USD/m²) | Área (m²) | Costo total (USD) |
|---------------------------------|--|---------------------------------|------------------------------|
| Terreno | 100,00 | 740,0 | 74 000,00 |
| Construcción de Infraestructura | 200,00 | 375,0 | 75 000,00 |

El valor del terreno de 740,0 m², se estimó en 74 000,00 USD y el costo de la construcción de la infraestructura de la planta es de 75 000,00 USD, por lo que el costo total de la instalación de la planta es de 149 000,00 USD

3.6.2. COSTO DE EQUIPOS PRINCIPALES

Se determinó el costo de los principales equipos necesarios para la recuperación de aluminio de envases multicapa. Los valores se obtuvieron de referencias comerciales de acuerdo a las características de cada equipo descritas en la sección 3.5. La Tabla 3.27 se presenta los costos de los equipos necesarios para el proceso de recuperación de aluminio mediante tres etapas; desagregación, lixiviación y fusión.

Tabla 3.27 Costo de equipos principales para el proceso, incluido la etapa de lixiviación

| Equipo | Cantidad | Costo (USD) |
|-------------------------|-----------------|--------------------|
| Tanque de desagregación | 1 | 20 000,00 |
| Tanque de lixiviación | 2 | 10 000,00 |
| Horno eléctrico | 1 | 12 750,00 |
| Tamiz vibratorio | 2 | 20 000,00 |
| Equipo de destilación | 2 | 20 000,00 |
| TOTAL | | 82 750,00 |

La Tabla 3.28 presenta el costo de los equipos para la recuperación de aluminio en el proceso directo de desagregación y fundición de material de polietileno y aluminio

Tabla 3.28 Costo de equipos principales para el proceso, sin la etapa de lixiviación

| Equipo | Cantidad | Costo (USD) |
|-------------------------|-----------------|--------------------|
| Tanque de desagregación | 1 | 20 000,00 |
| Horno eléctrico | 1 | 12 750,00 |
| Tamiz vibratorio | 2 | 20 000,00 |
| TOTAL | | 52 750,00 |

Se realiza la comparación de los valores para el equipamiento de la planta necesario, de acuerdo a los diagramas de flujo presentados en las Figuras 3.16 y 3.17. La diferencia entre el costo de los equipos para la planta de recuperación de aluminio para los dos procesos es de 30 000,00 USD.

3.6.3. COSTOS FIJOS

Los costos fijos son aquellos valores que no dependen de la operación de la planta, es decir, rubros definidos que no son influenciados por la producción. Los principales costos fijos que se toman en cuenta son: salarios del personal, y mantenimiento de los equipos.

3.6.3.1. Salarios del personal

Los salarios del personal de la planta se detallan en la Tabla 3.29. Los sueldos de los trabajadores están calculados para un mes de trabajo, e incluyen todos los beneficios de ley como aportación al seguro social, décimo tercer y decimo cuarto sueldo.

Tabla 3.29 Salarios del personal

| Salario | Costo (USD/mes) |
|------------------|------------------------|
| 1 jefe de planta | 2 000,00 |
| 1 secretaria | 800,00 |
| 12 obreros | 6 000,00 |
| Total | 8 800,00 |

3.6.3.2. Mantenimiento de equipos

El costo de mantenimiento de los equipos se estimó con la relación de 2 % del costo de los equipos principales de la planta de la Tabla 3.27 para el proceso con lixiviación de polietileno y de la Tabla 3.28 para el proceso que incluye solamente la desagregación y fundición como etapas principales. En la Tabla 3.30 se presenta el valor de mantenimiento de los equipos para la planta de recuperación de aluminio que incluye la etapa de lixiviación de polietileno.

Tabla 3.30 Costo de mantenimiento de equipos de la planta de recuperación de aluminio con lixiviación de polietileno de envases multicapa

| Mantenimiento | Costo (USD/mes) |
|-----------------------------|------------------------|
| 2 % de inversión en equipos | 1 655,00 |

La Tabla 3.31 muestra el costo de mantenimiento mensual de los equipos de acuerdo al 2 % del valor de los equipos principales de la planta de recuperación de aluminio con etapa de desagregación y fundición.

Tabla 3.31 Costo de mantenimiento de equipos de la planta de recuperación de aluminio con lixiviación de polietileno de envases multicapa

| Mantenimiento | Costo (USD/mes) |
|-----------------------------|------------------------|
| 2 % de inversión en equipos | 1 055,00 |

3.6.4. COSTOS VARIABLES

Los costos variables en el análisis económico son aquellos que dependen de la cantidad de material procesado o la cantidad de producto obtenido. Entre los principales valores que se consideran en los costos variables están: materia prima, reactivos, electricidad y agua.

3.6.4.1. Materia prima

Para el estudio de pre factibilidad de la planta de recuperación de aluminio de envases multicapa, se estimó que la materia prima tendrá un costo de 0,03 USD, como valor máximo por cada envase multicapa. El costo de la materia prima incluye el valor de recolección y transporte.

La planta operara con 200 t de envases lo que corresponde a 7 000 000 envases multicapa con un peso aproximado de 28 g, por lo tanto el precio de materia prima es de 203 000,00 USD por mes.

3.6.4.2. Consumo de reactivos

El consume de reactivos en el proceso de recuperación de aluminio de envases multicapa se presenta en las etapas de lixiviación y fundición. Para la etapa de lixiviación se requiere la utilización de xileno como solvente para diluir el polietileno presente en las láminas provenientes de la desagregación. La cantidad de xileno necesaria por día, es de 10 000 kg, pero mediante recuperación y recirculación de solvente, esta cantidad se reduce a 2 500 kg de xileno. Se estimó que se tendrá pérdidas de solvente alrededor del 1 % por cada batch es decir 4 % del valor de consumo diario.

En la etapa de fundición de las láminas de aluminio se requiere la adición de sales fundentes para evitar la oxidación del aluminio y mejorar la pureza del mismo.

La mezcla de sales fundentes se compone por cloruro de potasio (KCl), cloruro de sodio (NaCl), y fluoruro de potasio (KF). La cantidad de cada elemento de la mezcla necesaria para la fundición de la producción diaria se presenta en la Figura 3.15. Los reactivos que se utilizarán serán de grado técnico lo que disminuye su costo. Para el caso del xileno su importación tendrá que contar con el permiso del Consep ya que es una sustancia controlada por este organismo. En la Tabla 3.32 se presenta el costo de los reactivos para la lixiviación y fundición.

Tabla 3.32 Consumo de reactivos para las etapas de lixiviación y fundición

| Reactivo/ Materia Prima | Consumo (kg/día) | Costo (USD/kg) | Valor (USD/día) | Valor (USD/mes) |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Xileno | 200,0 | 1,00 | 200,00 | 4 000,00 |
| Cloruro de sodio | 106,9 | 0,20 | 21,30 | 427,60 |
| Cloruro de potasio | 106,9 | 0,50 | 53,40 | 1 069,00 |
| Fluoruro de potasio | 11,2 | 1,80 | 20,10 | 403,20 |
| TOTAL | | | | 5 899,80 |

La Tabla 3.33 muestra el costo de reactivos para el proceso de fundición.

Tabla 3.33 Consumo de reactivos para las etapas de fundición

| Reactivo/ Materia Prima | Consumo (kg/día) | Costo (USD/kg) | Valor (USD/día) | Valor (USD/mes) |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Cloruro de sodio | 106,9 | 0,20 | 21,30 | 427,60 |
| Cloruro de potasio | 106,9 | 0,50 | 53,40 | 1069,00 |
| Fluoruro de potasio | 11,2 | 1,80 | 20,10 | 403,20 |
| TOTAL | | | | 1 899,80 |

3.6.4.3. Consumo de energía eléctrica

El consumo de energía de la planta que incluye tres etapas: desagregación lixiviación y fundición, se determina con base en el consumo de energía de los equipos

principales detallado en la Tabla 3.34. La potencia de los equipos se obtiene de catálogos comerciales, la cantidad de horas de trabajo de cada equipo se detallan en la Tabla 3.18, se calculó el costo de energía diaria con una tarifa de 0,08 USD/kW.

Tabla 3.34 Consumo de energía de los principales equipos de la planta incluido los equipos para la etapa de lixiviación

| Equipo | Cantidad | Potencia (kW.h) | Horas/día (h/día) | Energía/día (kW) | Costo/día (USD/día) |
|-------------------------|----------|-----------------|-------------------|------------------|---------------------|
| Tanque de desagregación | 1 | 355,0 | 4,0 | 1 420,0 | 118,00 |
| Tanque de lixiviación | 2 | 1,5 | 7,5 | 11,2 | 0,90 |
| Horno de fundición | 1 | 450,0 | 3,0 | 1 350,0 | 112,20 |
| Tamiz vibratorio | 2 | 8,0 | 8,0 | 64,0 | 5,30 |
| Equipo de destilación | 2 | 133,0 | 7,5 | 997,5 | 82,90 |
| TOTAL | | | | 3842,7 | 319,30 |

El valor presentado en la Tabla 3.34 corresponde al costo diario de energía, que proyectado para un mes es 6 386,00 USD, a este valor se le agrega el 20 % de gastos adicionales de energía debido a la operación de la planta, por lo que el valor de costo de energía mensual es 7 663,00 USD. Para la planta que incluye como procesos principales la desagregación y fundición, se tiene los consumos energéticos presentados en la Tabla 3.35.

Tabla 3.35 Consumo de energía de los principales equipos de la planta sin equipos de la etapa de lixiviación

| Equipo | Cantidad | Potencia (kW.h) | Horas/día (h/día) | Energía/día (kW) | Costo/día (USD/día) |
|-------------------------|----------|-----------------|-------------------|------------------|---------------------|
| Tanque de desagregación | 1 | 355,0 | 4,0 | 1 420,0 | 118,00 |
| Horno de fundición | 1 | 450,0 | 3,0 | 1350,0 | 112,20 |
| Tamiz vibratorio | 2 | 8,0 | 8,0 | 64,0 | 5,30 |
| TOTAL | | | | 2 834,0 | 235,50 |

El valor total de costo de energía presentado en la Tabla 3.35 corresponde al consumo diario, el valor para el consumo mensual es 4 710,00 USD, a este valor se le aumenta el 20 % debido al consumo de la planta, por lo tanto el valor final por consumo energético es 5 652,00 USD.

3.6.4.4. Consumo de Agua

Para la operación de la planta se requiere de gran cantidad de agua en el proceso de desagregación. El agua se recupera mediante el tamizado de la pulpa que permite recircular la mayor parte del agua por cada ciclo, pero existe una parte de agua contenida en la pulpa de papel que tiene que reponerse cada lote que se procese.

La cantidad de agua que se pierde diariamente de acuerdo los diagramas de flujo presentados en las Figuras 3.16 y 3.17 es 11 250 kg, por lo tanto esta cantidad de agua debe reponerse al proceso cada día. El consumo mensual es 225,0 m³, se obtiene de multiplicar el consumo diario por veinte días laborables y por 1,2 como factor de consumo en otras áreas de la planta. Con base en un precio de agua de 0,30 USD/m³, se tiene un costo mensual por consumo de agua de 81,00 USD.

3.6.5. INGRESOS

La planta de recuperación de aluminio de envases multicapa genera ingresos de acuerdo a la obtención de dos productos. Los productos son pulpa de papel y aluminio.

Las características del metal y de la pulpa se detallan en los diagramas de flujo de las Figura 3.16 y 3.17. En la Tabla 3.36 se presenta el valor generado por la producción de la planta que incluye el proceso de lixiviación.

Tabla 3.36 Ingresos de la planta que utiliza etapa de lixiviación

| Material | Producción diaria (t/día) | Producción mensual (t/mes) | Precio (USD/t) | Ingreso mensual (USD/mes) |
|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------|---------------------------|
| Pulpa de papel | 12,5 | 250,0 | 840,00 | 210 000,00 |
| Aluminio | 0,6 | 11,3 | 2 064,10 | 23 242,00 |
| TOTAL | | | | 233 242,00 |

Los valores de ingresos generados por la planta de recuperación de aluminio mediante procesos de desagregación y fundición en presencia de sales fundentes, se presenta en la Tabla 3.37.

Tabla 3.37 Ingresos de la planta que no utiliza etapa de lixiviación

| Material | Producción diaria (t/día) | Producción mensual (t/mes) | Precio (USD/t) | Ingreso mensual (USD/mes) |
|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Pulpa de papel | 12,5 | 250,0 | 840,00 | 210 000,00 |
| Aluminio | 0,23 | 4,7 | 2 064,10 | 9 784,00 |
| TOTAL | | | | 219 784,00 |

Los precios de los productos se obtuvieron de indicadores comerciales. El costo de aluminio es 2 064,12 USD/t, y el valor de la pulpa de papel es de 845,00 USD.

El principal producto de la planta es la pulpa de papel reciclado, debido al volumen de producción, los ingresos generados son los principales dentro del análisis económico.

Los ingresos generados por la producción de aluminio son menores para la planta que no incluye el proceso de lixiviación, debido a que se produce mayor oxidación del metal y por lo tanto menor porcentaje de recuperación.

3.6.6. INDICADORES ECONÓMICOS

El estudio de prefactibilidad económica de la planta de recuperación de aluminio de envases multicapa con una capacidad de producción de 200 t de envases por mes se realizó con base en el análisis de indicadores económicos.

Los indicadores que permiten determinar el comportamiento financiero del proyecto son la tasa interna de retorno y el valor actual neto.

Tasa interna de retorno y valor actual neto

Para la determinación de los indicadores económicos del proyecto es necesario definir los ingresos anuales generados por la planta, y los egresos requeridos para la instalación y operación de la misma.

En la Tabla 3.38 se presentan los datos correspondientes a los egresos anuales de la planta de recuperación de aluminio de envases multicapa, con etapa de lixiviación de polietileno.

Tabla 3.38 Egresos anuales de la planta con etapa de lixiviación

| Egresos | USD/mes | USD/año |
|-------------------------|-------------------|---------------------|
| Costos fijos | 10 455,00 | 125 460,00 |
| Costos variables | 6 300,00 | 75 601,0 |
| Costos de materia prima | 203 000,00 | 2 436 000,00 |
| Total de egresos | 219 755,00 | 2 637 061,00 |

El total de egresos considera los costos fijos, variables y el costo de materia prima que se requieren para la operación de la planta. La Tabla 3.39 muestra los ingresos anuales generados por la producción de aluminio y pulpa de papel en la planta de recuperación que cuenta con proceso de lixiviación.

Tabla 3. 39. Ingresos anuales de la planta con etapa de lixiviación

| Ingresos | USD/mes | USD/año |
|-----------------------|-------------------|---------------------|
| Pulpa de papel | 210 000,00 | 2 520 000,00 |
| Aluminio | 23 242,00 | 278 904,00 |
| Total ingresos | 233 242,00 | 2 798 904,00 |

Con base en los valores presentados en la Tabla 3.38 y Tabla 3.39, se elaboró el flujo de caja de la planta, para una operación definida de 5 años. En la Tabla 3.40 se muestran los flujos anuales netos.

Tabla 3.40 Flujo de caja de la planta con etapa de lixiviación

| Flujo de caja | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ingresos totales (USD) | 0,00 | 2 798 904,00 | 2 798 904,00 | 2 798 904,00 | 2 798 904,00 |
| Egresos totales (USD) | 0,00 | 2 637 061,00 | 2 637 061,00 | 2 637 061,00 | 2 637 061,00 |
| Inversión inicial (USD) | 231 750,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Flujo neto (USD) | -231 750,00 | 161 842,00 | 161 842,00 | 161 842,00 | 161 842,00 |

El primer año de operación de la planta no se consideran los ingresos y los egresos, ya que el primer año se utilizará para la instalación de la planta. La inversión inicial se calculó como la sumatoria de los valores correspondientes a terreno, construcción y equipos principales.

Con base en los datos de flujos netos anuales presentados en la Tabla 3.40, se determinó los indicadores económicos para la planta de recuperación de aluminio de envases multicapa con proceso de lixiviación del polietileno. En la Tabla 3.41 se presentan los valores obtenidos para la tasa interna de retorno y el valor actual neto, considerando un interés del 10 %.

Tabla 3.41 Indicadores económicos de la planta con etapa de lixiviación

| | |
|------------------|------------|
| Interés % | 10,0 |
| TIR % | 59,0 |
| VAN (USD) | 215 565,00 |
| B/C | 1,1 |

El dato presentado de valor actual neto en la Tabla 3.41, es positivo, por lo tanto indica que el proyecto es económicamente factible. Cuando el valor actual neto es igual a cero, se calcula la tasa interna de retorno, que es la máxima rentabilidad que puede presentar la planta.

Los dos indicadores económicos obtenidos del flujo de caja de la planta permiten determinar que el proyecto es rentable.

En la Tabla 3.42 se muestran los resultados de egresos de la planta de recuperación de aluminio sin proceso de lixiviación de polietileno. Los costos fijos y variables se obtuvieron de la sumatoria de los diferentes rubros que los componen.

Tabla 3.42 Egresos anuales de la planta sin etapa de lixiviación

| Egresos | USD/mes | USD/año |
|-------------------------|-------------------|---------------------|
| Costos fijos | 9 855,00 | 118 260,00 |
| Costos variables | 2 216,30 | 26 595,60 |
| Costos de materia prima | 203 000,00 | 2 436 000,00 |
| Total de egresos | 215 071,00 | 2 580 855,00 |

La Tabla 3.43 presenta los valores de ingresos generados por la venta de pulpa de papel y de aluminio que se produce en la planta que no utiliza proceso de lixiviación.

Tabla 3.43 Ingresos anuales de la planta sin etapa de lixiviación

| Ingresos | USD/mes | USD/año |
|-----------------------|-------------------|---------------------|
| Pulpa de papel | 210 000,00 | 2 520 000,00 |
| Aluminio | 9 784,00 | 117 408,00 |
| Total ingresos | 219 784,00 | 2 637 408,00 |

Con base en los resultados presentados en la Tabla 3.42 y la Tabla 3.43 se realizó el flujo de caja de la planta de recuperación de aluminio sin etapa de lixiviación. En la Tabla 3.44 se muestran los resultados de los flujos netos anuales durante el periodo de operación de la planta.

Tabla 3.44 Flujo de caja de la planta sin etapa de lixiviación

| Flujo de caja | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ingresos totales (USD) | 0,00 | 2 637 408,00 | 2 637 408,00 | 2 637 408,00 | 2 637 408,00 |
| Egresos totales (USD) | 0,00 | 2 580 855,00 | 2 580 855,00 | 2 580 855,00 | 2 580 855,00 |
| Inversión inicial (USD) | 201 750,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Flujo neto (USD) | -201 750,00 | 56 552,00 | 56 552,00 | 56 552,00 | 56 552,00 |

Se determinaron los indicadores económicos del proyecto con base en el flujo de caja de la planta. Los valores de valor actual neto y de tasa interna de retorno se presentan en la Tabla 3.45.

Tabla 3.45 Indicadores económicos de la planta sin etapa de lixiviación

| | |
|------------------|------------|
| Interés % | 10,0 |
| TIR % | 5,0 |
| VAN (USD) | 196 094,00 |
| B/C | 1,0 |

Los indicadores económicos del proyecto determinan la factibilidad del proyecto, ya que presentan valores positivos. La tasa interna de retorno no presenta un valor alto, pero este valor puede aumentar a medida que se aumente el tiempo de operación de la planta.

Los resultados de indicadores económicos de la Tabla 3.41 y de la Tabla 3.45, permiten contrastar el beneficio de utilizar en el proceso la etapa de lixiviación de polietileno para mejorar la recuperación de aluminio y de esta manera aumenta los ingresos de la planta. La planta que incluye el proceso de lixiviación presenta mejores indicadores, por lo tanto su rentabilidad será mayor que en el caso de la planta que funde directamente el material proveniente de la desagregación.

3.6.7. ELECCIÓN DEL TIPO DE PLANTA DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en el balance de masa y energía para un día de operación de la planta. La Tabla 3.46 presenta el balance de masa de la planta de recuperación de aluminio a partir de envases.

Se diferencia las corrientes de entrada y de salida correspondientes a la planta con etapa de lixiviación y a la planta sin etapa de lixiviación.

Tabla 3.46 Resumen de balance de masa de las plantas con lixiviación y sin lixiviación para 10 000 kg de envases multicapa por día

| Balance de masa | Planta con lixiviación | | Planta sin lixiviación | |
|-------------------------------------|------------------------|----------|------------------------|----------|
| | Entrada | Salida | Entrada | Salida |
| Envases multicapa (kg) | 10 000,0 | 0,0 | 10 000,0 | 0,0 |
| Agua (kg) | 100 000,0 | 97 500,0 | 100 000,0 | 97 500,0 |
| Pulpa de papel (kg) | 0,0 | 12 500,0 | 0,0 | 12 500,0 |
| Xileno (kg) | 10 000,0 | 10 000,0 | 0,0 | 0,0 |
| Polietileno | 0,0 | 1 375,0 | 0,0 | 0,0 |
| NaCl (kg) | 1 069,0 | 1 069,0 | 1 069,0 | 1 069,0 |
| KCl (kg) | 1 069,0 | 1069,0 | 1 069,0 | 1069,0 |
| KF (kg) | 112,0 | 112,0 | 112,0 | 112,0 |
| Al ₂ O ₃ (kg) | 0,0 | 563,0 | 0,0 | 889,0 |
| Al (kg) | 0,0 | 563,0 | 0,0 | 236,0 |

Con base en el balance de masa presentado en la Tabla 3.46 se determinó que la planta con etapa de lixiviación produce mayor cantidad de aluminio por día. La Tabla 3.47 muestra el resumen del balance de masa de la planta de recuperación de aluminio tanto con etapa de lixiviación como para la planta sin lixiviación.

Tabla 3.47 Resumen de balance de energía de las plantas con lixiviación y sin lixiviación para un día de operación

| Equipo | Cantidad | Potencia | Horas/día | Planta con lixiviación | Planta sin lixiviación |
|-------------------------|----------|----------|-----------|------------------------|------------------------|
| | | | | Energía/día | Energía/día |
| | | (kW.h) | (h/día) | (kW) | (kW) |
| Tanque de desagregación | 1 | 355,0 | 4,0 | 1 420,0 | 1 420,0 |
| Tanque de lixiviación | 2 | 1,5 | 7,5 | 11,2 | 0,0 |
| Horno de fundición | 1 | 450,0 | 3,0 | 1350,0 | 1350,0 |
| Tamiz vibratorio | 2 | 8,0 | 8,0 | 64,0 | 64,0 |
| Equipo de destilación | 2 | 133,0 | 7,5 | 997,5 | 0,0 |
| TOTAL | | | | 3 842,7 | 2 834,0 |

La diferencia en el consumo de energía entre las dos plantas estudiadas, se evidencia en la Tabla 3.47. El mayor consumo energético de la planta con etapa de

lixiviación se debe al consumo del tanque de lixiviación y el equipo de destilación requeridos para la operación de solubilidad del polietileno.

En la Tabla 3.48 se presenta un cuadro comparativo de indicadores económicos para el análisis económico preliminar de la planta de recuperación de aluminio a partir de envases multicapa. Los indicadores analizados son la tasa interna de retorno (TIR), el valor actual neto (VAN) y la relación beneficio costo (B/C).

Tabla 3.48 Cuadro comparativo de indicadores económicos para la planta de recuperación de aluminio a partir de envases multicapa, con etapa de lixiviación y sin lixiviación

| Indicador | Planta con lixiviación | Planta sin lixiviación |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Interés % | 10,0 | 10,0 |
| TIR % | 59,0 | 5,0 |
| VAN (USD) | 215 565,00 | 196 094,00 |
| B/C | 1,1 | 1,0 |

Los indicadores económicos presentados en la Tabla 3.48, indican que la planta de recuperación de aluminio con etapa de lixiviación de polietileno es más rentable y genera mayores recursos que la planta sin etapa de lixiviación.

Con base en los resultados de balance de masa, energía e indicadores económicos, se determinó que la planta de recuperación de aluminio operara de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 3.16, es decir se incluye la etapa de lixiviación de polietileno.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- El proceso de desagregación de los envases multicapa permite la separación de la capa de cartón exterior. La experimentación demuestra que se pueden procesar cargas mayores a 1 % de envases con respecto a la cantidad de agua, durante 30 minutos de operación, para obtener 100 % de separación de la pulpa de cartón y las láminas de polietileno/aluminio.
- La separación de polietileno mediante lixiviación con xileno presentó 44,5 % de disminución del peso de la lámina en 3 h de operación, lo que corresponde al 75,0 % del peso del polímero presente. En los ensayos de lixiviación con tricloro benceno se obtuvo disminución del peso de la lámina de polietileno/aluminio de 41,6 %, en 3 h debido a que la temperatura de ebullición del solvente es mayor y se requiere más tiempo para que el vapor se condense en el extractor soxhlet y entre en contacto con las láminas.
- Las láminas metálicas obtenidas del proceso de lixiviación, presentan en su composición como principal elemento al aluminio con 96,6 %. Las impurezas que se encuentran en mayor proporción son: silicio con 1,69 % y hierro con 1,21 %.
- La adición de sales fundentes es fundamental en la fundición de láminas de aluminio, en especial en el caso de las láminas obtenidas de los envases multicapa, ya que se trata de una capa metálica muy fina que tiende a oxidarse fácilmente. La carga fundente que se utilizó en la experimentación representa el 200 % del peso del aluminio que ingresa al proceso. La mezcla de sales fundentes con 50 % de cloruro de sodio y 50 % de cloruro de potasio

permite obtener 40 % de recuperación de la fase metálica. La recuperación de aluminio aumenta a 50 % al agregar a la mezcla de sales fundentes 5 % de fluoruro de potasio.

- En el proceso de fundición de las finas láminas metálicas provenientes del proceso de lixiviación, se obtienen mejores resultados cuando se opera con temperatura de 750°C, durante 30 minutos
- La fundición de láminas de polietileno/aluminio provenientes del proceso de desagregación, bajo las mismas condiciones de fusión que las láminas metálicas resultantes de la lixiviación, alcanzan un valor de recuperación de aluminio de 21 %.
- El análisis químico de la fase metálica se realizó mediante espectrofotometría de chispa, y presento como resultado la presencia de aluminio como elemento principal con un porcentaje de 97,85 %. Las impurezas que alcanzan mayores valores son silicio con porcentaje de 1,03 % y hierro con 0,97 %
- La planta de recuperación de aluminio que incluye etapa de lixiviación, obtiene 11,3 t/mes, el proceso sin lixiviación recupera 4,7 t/mes.
- El estudio de prefactibilidad económica de la planta para procesar 200 t /mes, con etapa de lixiviación, presenta valores de tasa interna de retorno de 59 %, valor actual neto de 215 565,00 USD y relación beneficio costo de 1,1. Para la planta sin etapa de lixiviación, la tasa interna de retorno es 5 %, el valor actual neto es 196 094,00 USD y la relación beneficio costo es 1,0.
- La rentabilidad de la planta aumenta cuando se realiza el proceso de lixiviación con solventes, ya que se obtiene mayor cantidad de aluminio para generar mayores ingresos, y los egresos del proceso de lixiviación son menores que los generados por la operación del mismo.

4.2. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios sobre la recuperación de la pulpa de papel proveniente de los envases multicapa, ya que representa la mayor cantidad del material que compone los envases y por lo tanto el principal producto de la planta de acuerdo al volumen de producción.
- Desarrollar el proceso de lixiviación a escala de planta piloto para analizar la eficacia de la operación con mayor cantidad de material y determinar si su aplicación a escala industrial es factible. Además determinar si la recuperación de solvente se puede realizar con volúmenes mayores sin que eso signifique aumentar las pérdidas por evaporación.
- Durante el proceso de fundición es recomendable tomar las medidas necesarias para disminuir la oxidación del aluminio. Para esto se puede utilizar hornos con atmósferas inertes y evitar el ingreso de aire a la cámara de fundición durante el ingreso y salida del material.
- Realizar estudios de mercado para determinar si es factible obtener 200 t/mes de envases multicapa en una ciudad como Quito, o es necesario ampliar la zona de recolección de residuos a ciudades cercanas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abarca, P. y Muñoz, A. (2012). Reciclaje de tetra pak como aislante para implantación en construcciones marginales. *Investigatio*, 3, 115-127.
2. Abreu, M. (2000). *Recycling the fibres of tetra pak cartons*. Recuperado de http://www.ekopaket.si/upload/file/Recikliranje%20_vlaken_TP_embalaze.pdf?phpMyAdmin=8f4aea4ea78343d51594e6196d6e3172, (Diciembre, 2011)
3. Abreu, M. (2002). *Recycling of tetra pak aseptic cartons*. Recuperado de <http://www.environmental-expert.com/Files/0/articles/2268/tetrapak.pdf>, (Diciembre, 2011)
4. Abril, E. (1956). *Metalurgia técnica y fundición*. Buenos Aires, Argentina: Alsina.
5. Agencia de Residuos de Catalunya. (2010). *Características de la recogida selectiva de papel y cartón*. Recuperado de http://www20.gencat.cat/portal/site/arc/menuitem.60fb2478680e61fd624a1d25b0c0e1a0/?vgnnextoid=8697d30f712d6210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextchannel=8697d30f712d6210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextfmt=default&newLang=es_ES (Diciembre, 2012)
6. Agudelo, A. y Restrepo, O. (2005). Termodinámica y diagramas de fase. *Dyna*, 72 (145), 13-21
7. Askeland, D. (1985). *La Ciencia e ingeniería de los materiales*, México D.F., México: Iberoamérica
8. Aspin, T. 1995. *Principios de fundición*. México: G.Gili,

9. Agarwal, R., Durga, P., Maity, S., Gayen, K. y Ganguly, S. (2004). Experimental measurement and model based inferencing of solubility of polyethylene in xylene. *Journal of chemical engineering of Japan*, 37(12), 1427-1435
10. Araujo, C., do Carmo, M., y Felisberti, M. (2007). Blends of poly(ethylene terephthalate) and low density polyethylene containing aluminium: a material obtained from packaging recycling. *Journal of applied polymer science*, 106, 2524-2535
11. Bailey, A. (1984). *Aceites y grasas industriales*. Barcelona, España: Reverte
12. Bermudez, J. (1990). *Reconocimiento de materiales sintéticos*. Recuperado de <http://bdigital.eafit.edu.co/ARTICULO/HRU0380000077199005/077-04.pdf>, (Diciembre, 2011)
13. Billmeyer, F. (1975). *Ciencia de los polímeros*. Barcelona, España: Reverte
14. Cadena, F. (2000). *Manual de reciclaje de plásticos*.
15. Charlier, P. y Sjoberg, G. (1995). Recycling Aluminum Foil from Post-Consumer Beverage Cartons. *Journal of the minerals metals and materials*, 47(10), 12-13
16. Chung, A. (2003). *Tectan, reciclado tetra pack*. *Industrial Data*, 6(001), 83-85
17. Diputación foral de Biskaia. (2007). *Reciclado de materiales: perspectivas, tecnologías y oportunidades*. Recuperado de <http://www.efn.uncor.edu/etc/reciclado/web/informacion/Inf10.pdf>, (Diciembre, 2011)
18. DeGarmo, P., Black, T., y Kohser, R. (1994). *Materiales y procesos de fabricación*. Barcelona, España: Reverte

19. De la Torre, E., Yépez, S., Guevara, A. y Lucion, C. (2011). Recyclage, par voie pyrométallurgique, de l'aluminium contenu dans divers déchets industriels et électroniques. *Recyclage & Valorisation*, (34), 48-55
20. De Marco, I. (1995). Recycling polymeric wastes by means of pyrolysis. *Journal of chemical technology and biotechnology*, 77, 817-824
21. Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. y Servicio de Salud Pública Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2007). *Resumen de salud pública xileno*. Recuperado de http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs71.html, (Diciembre, 2011)
22. Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. y Servicio de Salud Pública Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2010). *Resumen de salud pública tricloro benceno*. Recuperado de http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs199.html, (Diciembre, 2011)
23. Dominguez, J. y Guemez, D. (2010). Fabricación y evaluación de paneles aplicables a la industria de la construcción a partir del reciclaje de envases multicapa (tetrabrick): *Ingeniería revista académica*, 14(3), 191-195
24. Dunais, M. (2009). *Cost benefit analysis of aseptic carton recycling in bandung indonesia*. Recuperado de http://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/978/090423_MP_AsepticCartonsRecycling_Dunais_FINAL.pdf?sequence=1 (Diciembre, 2011)
25. El-Hagar, S. (2007). *Sustainable industrial design and waste management*. London, United Kingdom: Elsevier
26. Endara, D. (2004). *Recuperación de aluminio de los envases tetrapack mediante un proceso de pirólisis, fusión y lixiviación*. (Proyecto de titulación previa a la

obtención del título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

27. Fondo Nacional del Ambiente-Perú. (2008). *Estudio de prefactibilidad producción de pulpa de cartón y pulpa de polialuminio*. Recuperado de http://www.fonamperu.org/general/agua/documentos/Pre_Factibilidad.pdf (Diciembre, 2011)
28. Gallo, R. (2002). *Development, Evaluation and Application of Granular and Powder Fluxes in Transfer Ladles, Crucible and Reverberatory Furnaces*. Recuperado de http://www.foseco.com.tr/tr/downloads/FoundryPractice/23702_Development_evaluation_appli_of_granular_flu.pdf (Marzo, 2012)
29. Gallo, R. (2007). *Granular and powder fluxes for aluminum alloys. Cleaning efficiency, cost and environmental aspects*. Recuperado de http://www.foseco.com.tr/tr/downloads/FoundryPractice/FP_247_01_Granular_and_powder_fluxes.pdf (Marzo, 2012)
30. Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Mexico D.F, México: Pearson/Prentice Hall
31. Hidalgo, M. (2011). Manufacturing rigid board by packaging waste containing aluminum and polyethylene. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 70, 232-234
32. Hufnagel, W. (1992). *Manual del aluminio*. Barcelona, España: Reverte
33. Inche, J., Vergiú, J., Mavila, D., Godoy, M. y Chung, A., (2004). Diseño y evaluación de una planta de reciclaje de envases tetra pak a pequeña escala. *Industrial Data*, 7(002), 7-17

34. Lopes, C. y Felisberti, M. (2005). *Composite of low-density polyethylene and aluminum obtained from the recycling of postconsumer aseptic packaging*. Recuperado de http://www.zabetakis.net/files/images/recycling_postconsumer_aseptic_packaging.pdf (Diciembre, 2011)
35. McMurry, J. (2008). *Química Orgánica*. Mexico D.F., México: Cengage Learning
36. Neves, F. (2004). *Novos desenvolvimentos ara reciclagem de embalagens longa vida*. Recuperado de <http://www.afcal.pt/destinoFinal/NovosDesenvolvimentosReciclagem.pdf>, (Diciembre, 2011)
37. Neves, F. y von Zuben, F. (2005). *Reciclagem de embalagens longa vida em planta compacta e pequena escala*. Recuperado de http://www.esculturasurbanas.com.br/site/downloads/Reciclagem_por_metodo_de_planta_compacta.pdf (Diciembre, 2011)
38. Neves, F. y von Zuben F. (1999). Recycling of aluminum and polyethylene present in tetra pak packages. Recuperado de <http://www.eko-paket.si/upload/file/Recikliranje%20alu%20in%20polietilena%20v%20TP%20embalazi.pdf> (Diciembre, 2011)
39. Reyes, H. (2007). *Reciclaje de envases tetra pak: su factibilidad técnica y económica*. (Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Industrial), Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
40. Richard, D. (2003), *Las drogas*. México: siglo XXI editores
41. Seymour, R. y Carraher, C. (1995). *Introducción a la química de los polímeros*. Barcelona, España: Reverte

42. Sibley, S. (1995). *Granular fluxes for aluminum alloys, environmental and technological advances*. Recuperado de http://www.foseco.com.tr/tr/downloadsFoundryPractice/22705_Granular_Fluxes.pdf (Marzo, 2012)
43. Totten G., Mackenzie D., (2003), *Handbook of Aluminum*, New York, EEUU: Marcel Dekker Inc
44. von Zuben, F. (2002). *The thermal plasma technology separates aluminum from plastic in packages*. Recuperado de http://lib.hpu.edu.cn/comp_meeting/Environmental%20Geotechnology%20and%20Global%20Sustainable%20Development/Pages%2072230%20von%20Zuben.pdf (Diciembre, 2011)
45. Sanz, I., Raigon, M., Llores, J., y Llopis, R., (2002), *Prácticas de química orgánica*, , Valencia, España: Editorial Universidad Politécnica de Valencia
46. Yépez, S. (2010). *Reciclaje de aluminio a partir de desechos industriales y electrónicos, mediante fusión en presencia de sales de cloro y flúor*. (Proyecto de titulación previa a la obtención del título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

ANEXOS

ANEXO I

HOJAS DE SEGURIDAD DE LOS SOLVENTES

XILENO

Sinónimos: Xilol, Dimetilbenceno

Fórmula: C₆H₄(CH₃)₂

Composición: m-xileno y contiene otros hidrocarburos aromáticos tales como benceno, tolueno y etilbenceno

Número CAS: 1330-20-7

Usos: Solvente en pinturas, impresión, industria del caucho y del cuero, solvente para gomas y resinas y dibencilcelulosa, constituyente de pinturas, lacas, barnices, secado, adhesivos y fluidos de limpieza; constituyente de combustibles para motores y aviones, síntesis química, perfumes y repelentes para insectos.

EFECTOS PARA LA SALUD

Límites de exposición ocupacional:

TWA: 434 (PIEL) mg/m³

STEL: 651 mg/m³

TECHO (C): N.R.

Inhalación: Irritación de vías respiratorias, náuseas, dolor de cabeza y depresión del sistema nervioso central.

Ingestión: Irritación gastrointestinal, fatiga, pérdida de consciencia, náusea y vómito.

Piel: El contacto repetido y prolongado puede ocasionar dermatitis. Se absorbe a través de la piel presentando efectos narcóticos.

Ojos: Enrojecimiento, irritación. Se han reportado vacuolas corneales.

Efectos Crónicos: Repetido o prolongado contacto produce dermatitis. Efectos neurológicos: dolor de cabeza, insomnio, agitación, temblores, pérdida de la concentración y de la memoria a corto tiempo. Efectos al hígado y riñones: Se han reportado daños al riñón, pero no se han concluido los estudios

RIESGOS DE INCENDIO Y/O EXPLOSION

Punto de inflamación (°C): 27(m-,p-);32(o-)

Temperatura de autoignición (°C): 463.9

Límites de inflamabilidad (%V/V): 3.65-3.7

Peligros de incendio y/o explosión:

Altamente inflamable y explosivo. Volátil. Emite vapores más pesados que el aire que pueden viajar hacia una fuente de ignición y regresar en llamas. Forma mezclas inflamables con el aire.

Productos de la combustión:

Dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos y aldehídos.

Precauciones para evitar incendio y/o explosión:

Mantener retirado de las zonas donde exista riesgo de fuego y en recipientes bien tapados. Proveer de buena ventilación a nivel del piso. No fumar en los sitios de trabajo. Conectar a tierra los recipientes para evitar descargas electrostáticas. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de explosiones.

Procedimientos en caso de incendio y/o explosión:

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Estar a favor del viento. Usar equipo de protección personal.

Agentes extintores del fuego:

Polvo químico seco, espuma, dióxido de carbono y agua en forma de neblina.

ALMACENAMIENTO Y MANIPULACION

Almacenamiento: Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles. Rotular los recipientes adecuadamente y mantenerlos bien cerrados.

Tipo de recipiente:

Manipulación: Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en dónde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente.

PROCEDIMIENTOS EN CASO DE ESCAPE Y/O DERRAME

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Estar a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. Eliminar toda fuente de ignición. Usar agua en forma de rocío para reducir los vapores.

EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL/CONTROL EXPOSICION

Uso Normal: Gafas de seguridad, careta, guantes y delantal de caucho. Respirador con filtro para vapores orgánicos.

PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Apariencia: Líquido incoloro con olor aromático.

Gravedad Específica (Agua=1): 0.86-0.87 / 20°C

Punto de Ebullición (°C): 138 - 144

Punto de Fusión (°C): -25

Densidad Relativa del Vapor (Aire=1): 3.65-3.7

Presión de Vapor (mm Hg): 6.0 / 20°C

Viscosidad (cp): 0.620-0.810 /20°C

pH: N.A.

Solubilidad: Insoluble en agua. Soluble en alcohol, éter y otros compuestos orgánicos.

ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad: Estable bajo condiciones normales.

Incompatibilidades o materiales a evitar:

Agua: No **Aire:** No **Otras:** Agentes oxidantes.

INFORMACION TOXICOLOGICA

IRRITACION A LOS OJOS(conejo): Aplicación de xileno causa mediana irritación y pasajero daño a la córnea.

IRRITACION A LOS OJOS (gato): Resulta en finas vacuolas en la córnea que desaparecieron en 24 horas.

IRRITACION A LA PIEL: Una sola aplicación de una cantidad inespecificada de xileno causa irritación e hinchazón a la piel de conejos y conejillos de indias. Aplicación de 0.5 ml de una mezcla de xileno (sin composición específica) a conejos por 24 horas causó una moderada irritación.

INHALACION-LARGO TIEMPO: Animales estudiados han provisto evidencia de daño a los riñones,

TRICLORO BENCENO

Chemical Product and Company Identification

Product Name: 1,2,4-Trichlorobenzene

CAS#: 120-82-1

Chemical Name: 1,2,4,-Trichlorobenzene

Chemical Formula: C₆H₃Cl₃

Fire and Explosion Data

Flammability of the Product: May be combustible at high temperature.

Auto-Ignition Temperature: 571°C (1059.8°F)

Flash Points: CLOSED CUP: 110°C (230°F).

Flammable Limits: LOWER: 2.5 % UPPER: 6.6 %

Products of Combustion: These products are carbon oxides (CO, CO₂), halogenated compounds.

Accidental Release Measures

Small Spill: Absorb with an inert material and put the spilled material in an appropriate waste disposal.

Large Spill: If the product is in its solid form: Use a shovel to put the material into a convenient waste disposal container. If the product is in its liquid form: Absorb with an inert material and put the spilled material in an appropriate waste disposal. Be careful that the product is not present at a concentration level above TLV. Check TLV on the MSDS and with local authorities.

Handling and Storage

Precautions:

Keep away from heat. Keep away from sources of ignition. Empty containers pose a fire risk, evaporate the residue under a fume hood. Ground all equipment containing material. Do not ingest. Do not breathe gas/fumes/ vapour/spray. In case of insufficient ventilation, wear suitable respiratory equipment. If ingested, seek medical advice immediately and show the container or the label. Avoid contact with skin and eyes. Keep away from incompatibles such as oxidizing agents, reducing agents, organic materials, metals, acids, alkalis.

Storage:

Keep container dry. Keep in a cool place. Ground all equipment containing material. Keep container tightly closed. Keep in a cool, well-ventilated place. Combustible materials should be stored away from extreme heat and away from strong oxidizing agents.

Exposure Controls/Personal Protection

Engineering Controls:

Provide exhaust ventilation or other engineering controls to keep the airborne concentrations of vapors below their respective threshold limit value. Ensure that eyewash stations and safety showers are proximal to the work-station location.

Personal Protection:

Splash goggles. Lab coat. Vapor respirator. Be sure to use an approved/certified respirator or equivalent. Gloves.

Personal Protection in Case of a Large Spill:

Splash goggles. Full suit. Vapor respirator. Boots. Gloves. A self contained breathing apparatus should be used to avoid inhalation of the product. Suggested protective clothing might not be sufficient; consult a specialist BEFORE handling this product.

Exposure Limits:

TWA: 5 (ppm) TWA: 37 (mg/m³) Consult local authorities for acceptable exposure limits.

Physical and Chemical Properties

Physical state and appearance: Liquid. (Liquid.)

Odor: Pungent. (Slight.)

Taste: Toxic by ingestion.

Molecular Weight: 181.46 g/mole

Color: Colorless.

pH (1 % soln/water): Not applicable.

Boiling Point: 213°C (415.4°F)

Melting Point: 17°C (62.6°F)

Critical Temperature: Not available.

Specific Gravity: 1.45 (Water = 1)

Vapor Pressure: Not available.

Vapor Density: 6.26 (Air = 1)

Volatility: Not available.

Odor Threshold: Not available.

Water/Oil Dist. Coeff.: Not available.

Ionicity (in Water): Not available.

Dispersion Properties: See solubility in water, methanol, diethyl ether, n-octanol.

p. 4

Solubility:

Easily soluble in diethyl ether. Soluble in methanol, n-octanol. Insoluble in cold water, hot water.

Stability and Reactivity Data

Stability: The product is stable.

Instability Temperature: Not available.

Conditions of Instability: Not available.

Incompatibility with various substances:

Highly reactive with oxidizing agents. Reactive with reducing agents, organic materials, metals, acids, alkalis.

ANEXO II

DIAGRAMAS DE FASE DE MEZCLAS DE SALES

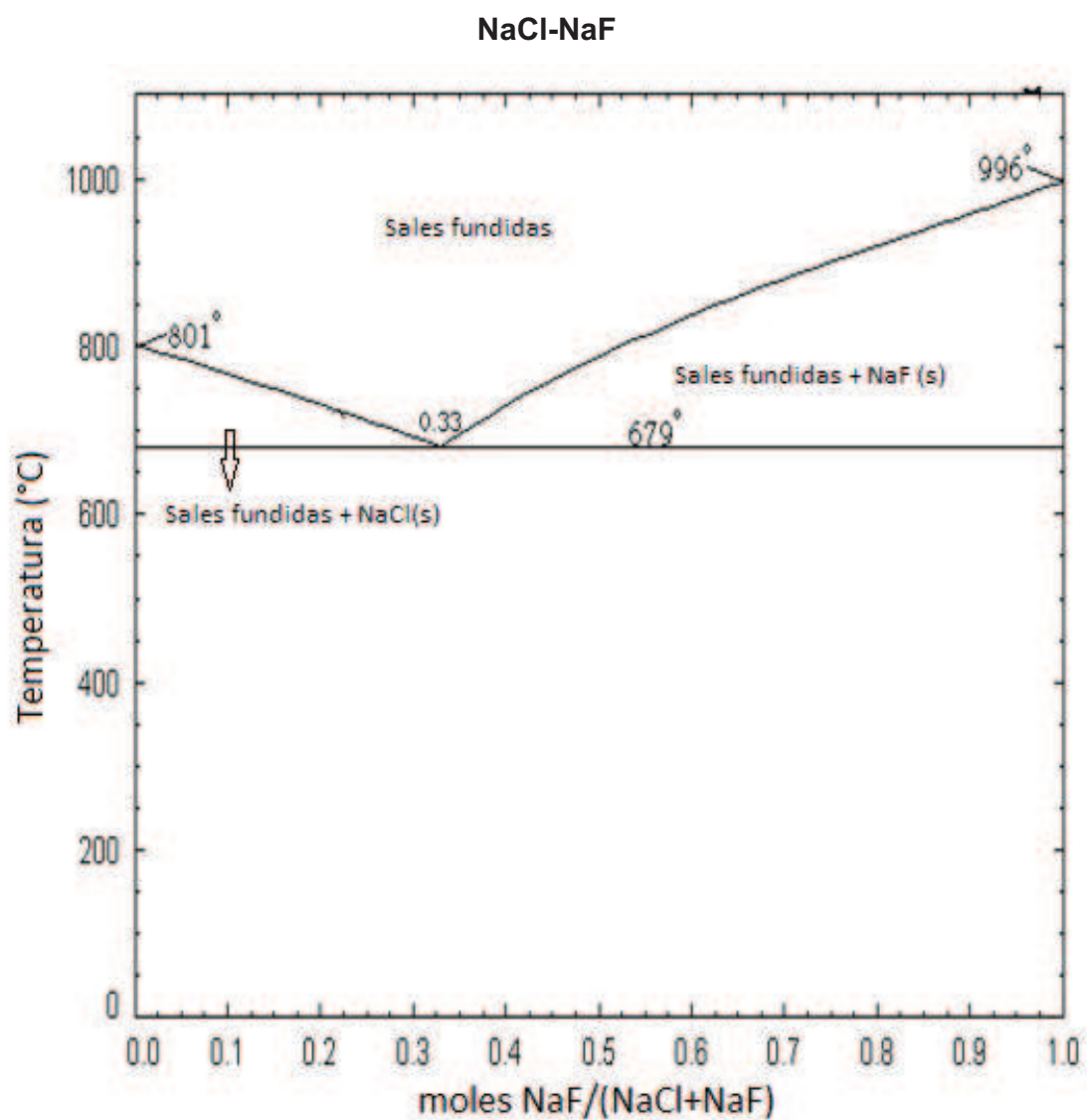


Figura A.II.1 Diagrama de fase para la mezcla NaCl-NaF

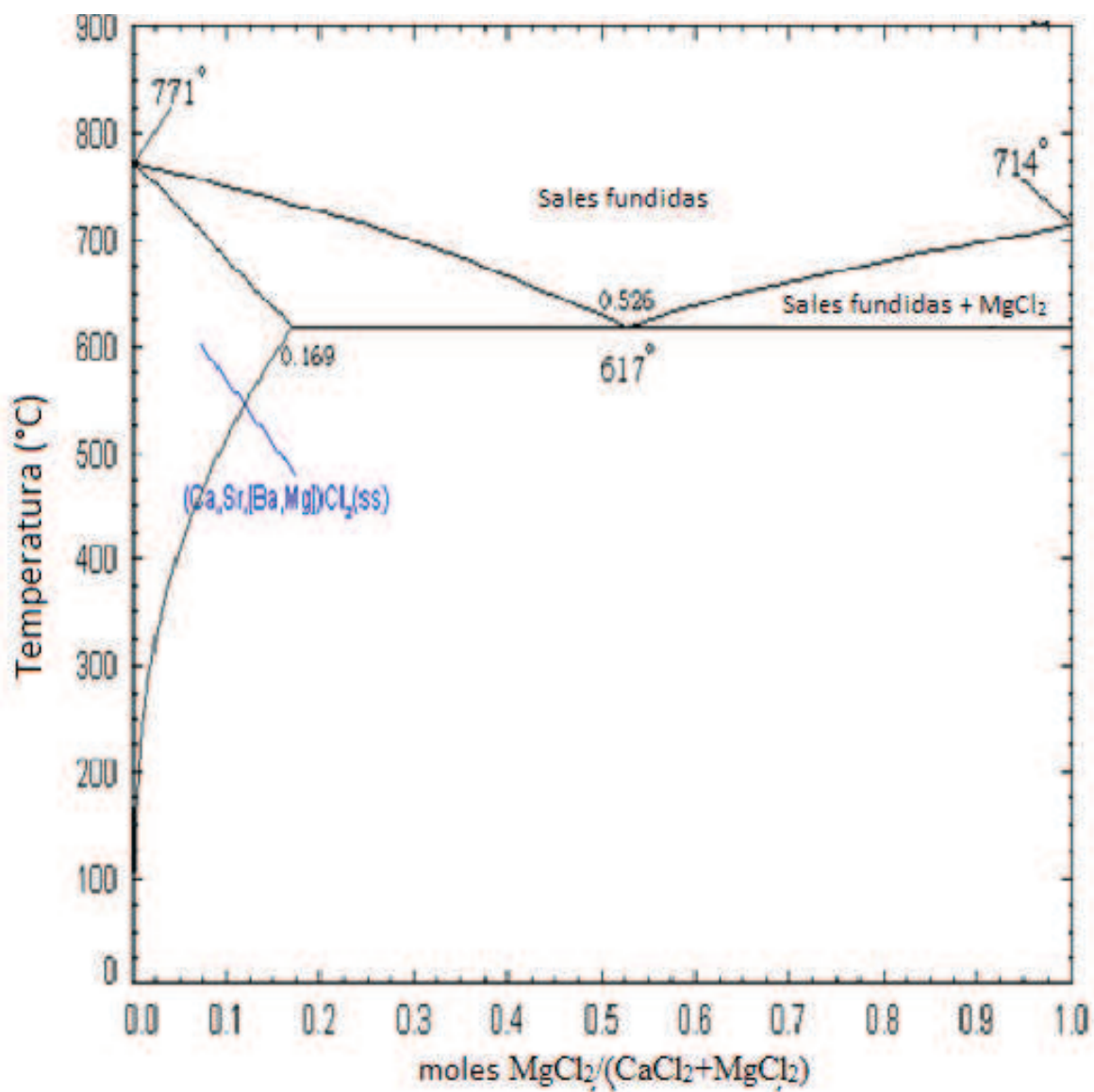
CaCl₂-MgCl₂

Figura A.II.2 Diagrama de fase para la mezcla CaCl₂-MgCl₂

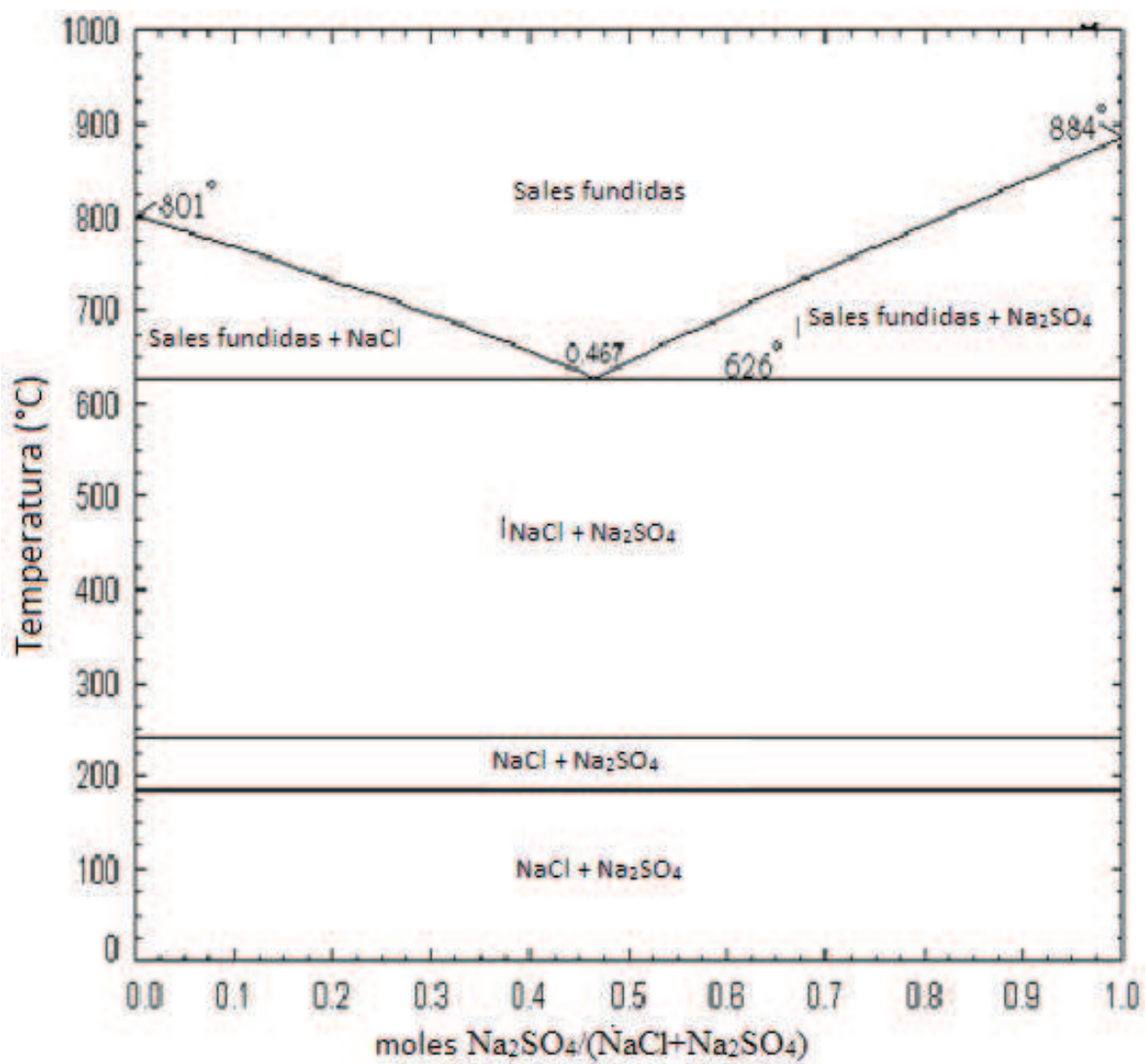
NaCl-Na₂SO₄

Figura A.II.3 Diagrama de fase para la mezcla NaCl-Na₂SO₄

KF-NaF

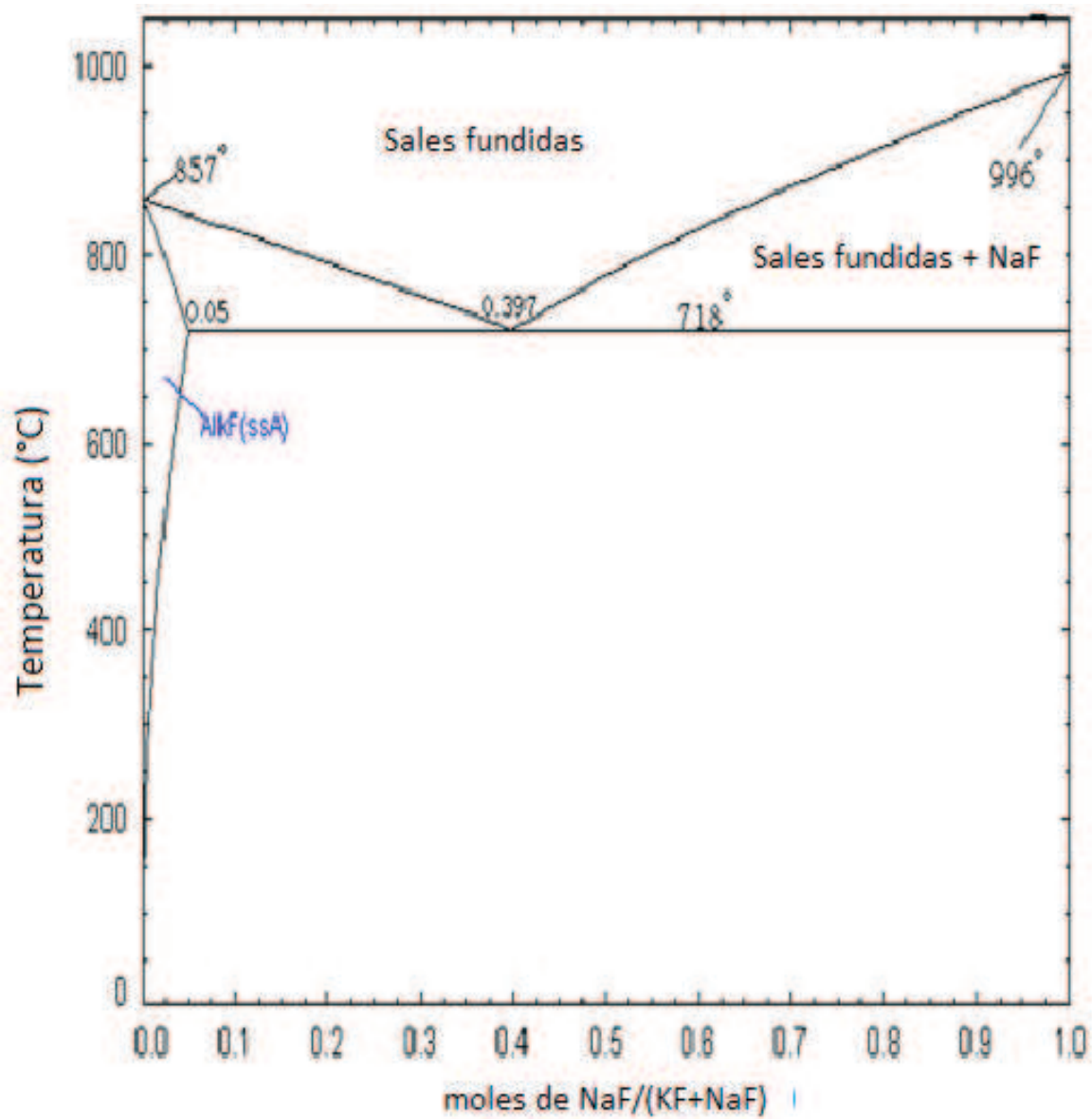


Figura A.II.4 Diagrama de fase para la mezcla KF-NaF

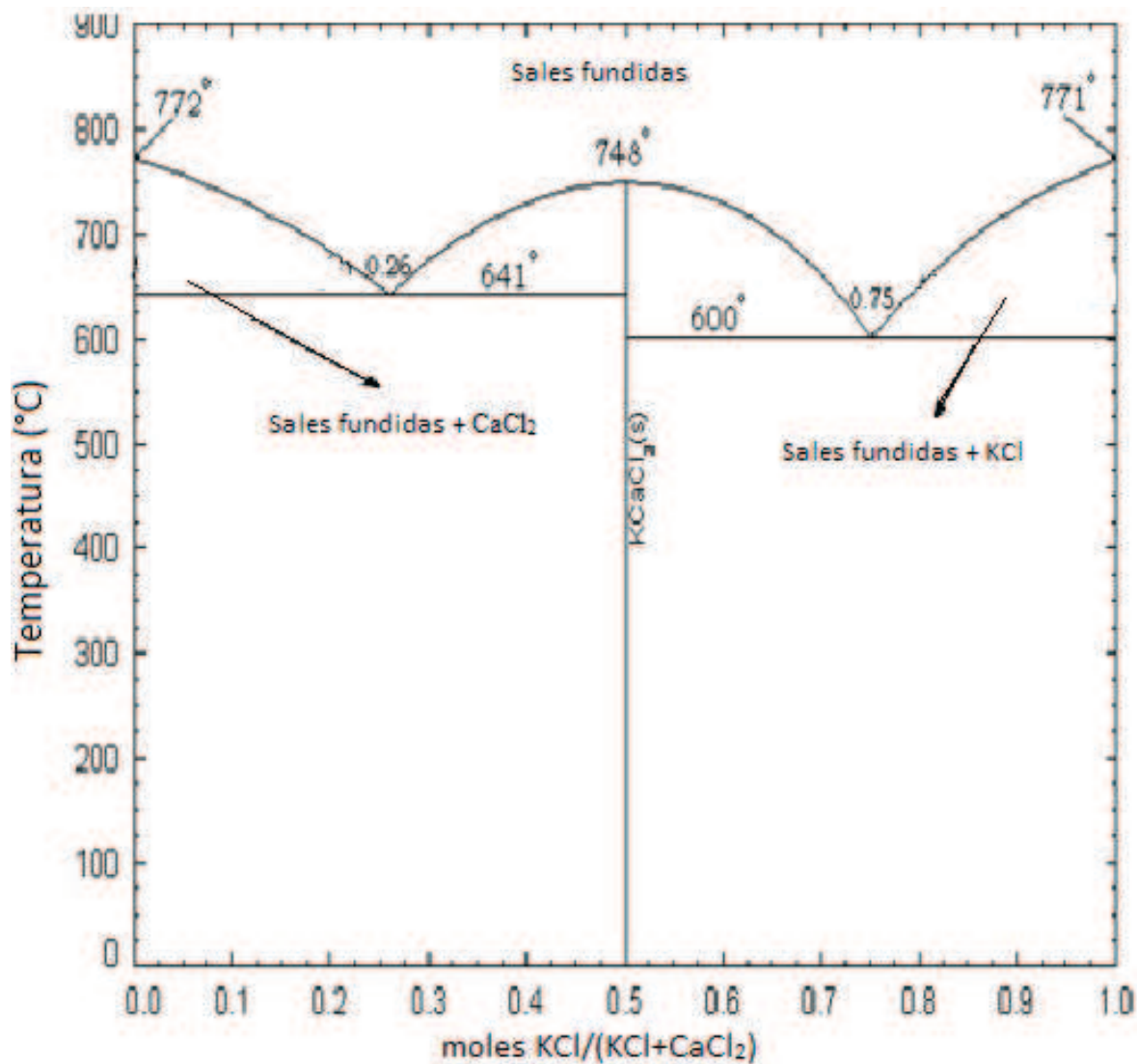
KCl-CaCl₂

Figura A.II.5 Diagrama de fase para la mezcla KCl-CaCl₂

http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/FTsalt/FTsalt_Figs.htm
Center for research in computational thermochemistry

ANEXO III

CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS

TANQUE DESAGREGADOR

Tipo: Equipo de pulpeo

Marca: TENGSHUO

Modelo: TS

Volumen: 40 m³

Capacidad de producción: 300-370 t/día

Poder del motor: 350 kW



Figura A.III.1 Tanque desagregador

Tabla A.III.1 Características de catálogo de tanque desagregador

| Modelo | Volumen nominal (m ³) | Capacidad de producción (t/día) | Consistencia (%) | Potencia (kW) |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------|---------------|
| TS-10 | 10 | 60-90 | 2-5 | 110 |
| TS-15 | 15 | 80-120 | | 160 |
| TS-20 | 20 | 140-180 | | 185 |
| TS-25 | 25 | 180-230 | | 250 |
| TS-30 | 30 | 230-280 | | 280 |
| TS-40 | 40 | 300-370 | | 355 |

TANQUE DE LIXIVIACIÓN

Tipo: Equipo de mezcla con calefacción

Marca: Wuhan Dingxin Mechanical Electric Equipment Co., Ltd.

Modelo: jbj-1200

Volumen: 2,5 m³

Diámetro: 1,2 m

Altura: 2,2 m

Poder del motor: 1,5 kw



Figura A.III.2 Tanque de lixiviación

Tabla A.III.2 Características de catálogo de tanque de lixiviación

| Modelo | Potencia (kW) | Velocidad de ronda | Diámetro del eje de (mm) | Longitud (mm) | Diámetro del impulsor (mm) |
|----------|---------------|--------------------|--------------------------|---------------|----------------------------|
| Jbj-800 | 0.75-1.1 | 8-20 | 48 | 1500-2000 | 800 |
| Jbj-1200 | 0.75-1.5 | 6-20 | 57 | 1500-3000 | 1200 |
| Jbj-1500 | 0.75-1.5 | 5-12 | 76 | 2000-3000 | 1500 |
| Jbj-2000 | 1.1-1.5 | 5-12 | 89 | 2000-4000 | 2000 |
| Jbj-2500 | 1.1-2.2 | 3-10 | 108 | 3000-4500 | 2500 |
| Jbj-3000 | 1.5-3 | 3-10 | 108 | 3000-5000 | 3000 |

HORNO ELÉCTRICO

Tipo: Horno de fusión eléctrico

Marca: YIPHEE

Capacidad: 750 kg/d

Potencia: 450 kW

Consumo de energía: 600 kwh/t

Tabla A.III.3 Características de catálogo de horno eléctrico

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| la capacidad nominal | | 10-50 | 100 | 150 | 250 | 350 | 500 | 750 | 1000 | 1500 | 2000 | 3000 | 5000 |
| la potencia nominal | kW | 50 | 100 | 100 | 130 | 180 | 250 | 450 | 600 | 1000 | 1250 | 1500 | 2500 |
| voltaje de entrada | V | 380 | 380 | 380 | 380 | 380 | 380 | 380 | 380-2 | 380-2 | 380-2 | 380-2 | 660-2 |
| la capacidad del transformador | Kva | 60 | 120 | 120 | 150 | 200 | 315 | 500 | 800 | 1500 | 1800 | 2000 | 3500 |
| salida de tensión | V | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 1500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 3500 |
| frecuencia de salida | kHz | 2.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 0.5 |
| el tiempo de fusión | Min | 20-60 | 20-60 | 30-70 | 30-70 | 30-70 | 30-70 | 40-80 | 50-90 | 50-90 | 50-90 | 60-100 | 60-100 |
| El consumo de energía (acero) | kW. H/t | 900 | 850 | 850 | 800 | 750 | 700 | 650 | 620 | 600 | 580 | 570 | 560 |
| El consumo de energía (de hierro fundido) | kW. H/t | 850 | 800 | 800 | 750 | 700 | 650 | 630 | 610 | 580 | 570 | 560 | 550 |
| El consumo de energía (cobre) | kW. H/t | 500 | 500 | 500 | 490 | 480 | 480 | 400 | 390 | 380 | 360 | 330 | 310 |
| El consumo de energía (aluminio) | kW. H/t | 780 | 750 | 750 | 710 | 670 | 620 | 600 | 570 | 540 | 520 | 500 | 500 |
| de enfriamiento de agua | t/h | 3 | 5 | 5 | 7 | 8 | 10 | 15 | 18 | 25 | 28 | 35 | 43 |

TAMIZ VIBRATORIO

Tipo: Equipo de pulpeo

Marca: Leizhan

Modelo: ZSK3

Capacidad de producción: 75 t/día

Área: 3 m³

Poder del motor: 4 kW



Figura A.III.3 Tamiz vibratorio

Tabla A.III.4 Características de catálogo de tamiz vibratorio

| Tipo | zsk1 | zsk2 | zsk3 |
|--|---------|-------|-------|
| El área de la pantalla (m2) | 1 | 2 | 3 |
| Producto de la capacidad del agujero de la pantalla (t/d) | 7.5-25 | 12-50 | 25-75 |
| Producto de la capacidad de la brecha de la pantalla (t/d) | 3.5-75 | 7-15 | 11-25 |
| Pulpa de entrada de la concentración del agujero de la pantalla (%) | 1.0-1.5 | | |
| Pulpa de entrada de la concentración de la brecha de la pantalla (%) | 0.5-0.8 | | |
| Motor eléctrico de potencia (kW) | 2.2 | 3-7 | 4 |

EQUIPO DE DESTILACIÓN

Tipo: Horno de fusión eléctrico

Marca: Kemei

Modelo: JC

Volumen de tanque: 1500 L

Volumen de torre: 3200 L

Altura de torre: 7,5 m

Diámetro de torre: 0,8 m

Área: 0,9 m²

Reflujo: 0,9

Tabla A.III.5 Características de catálogo de equipo de destilación

| Technical data | | HT-200 | HT-300 | HT-400 | HT-500 | HT-600 | HT-800 |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Specification | Type | | | | | | |
| | | Diameter of tower (mm) | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| | Height of tower (mm) | 6000 | 7000 | 7000 | 7000 | 7500 | 7500 |
| | Volume of kettle in tower (L) | 640 | 1220 | 1450 | 2300 | 2500 | 3200 |
| | Recovery capacity (Kg/h) | 45~50 | 90~100 | 10~160 | 280~300 | 420~440 | 600~620 |
| | Heating area (m ²) | 3 | 5 | 6.5 | 10 | 15 | 26 |
| | Condensing area (m ²) | 5 | 9 | 12 | 22 | 25 | 45 |
| | Cooling area (m ²) | 1 | 1.5 | 2.2 | 4 | 6 | 8 |
| | Filler form | Stainless steel belows packing | | | | | |
| | Recovery density (%) | 95% | 95% | 95% | 95% | 95% | 95% |
| Outline dimensions (m) | D1 | 2.3 | 2.6 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4.2 |
| | D2 | 0.7 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.8 |
| | H | 7.3 | 7.5 | 9 | 9 | 10 | 14 |
| | Equipment Weight (Kg) | 1100 | 1900 | 2300 | 3800 | 4500 | 6800 |

ANEXO IV

ENSAYOS DE DESAGREGACIÓN

FICHA TÉCNICA No: 1

ENSAYO: DESAGREGACIÓN

MUESTRA: D1

OBJETIVO: DESAGREGACIÓN DE PAPEL

PARÁMETROS:

TIPO DE MUESTRA: Envase multicapa
 CANTIDAD DE ENVASES: 10
 VOLUMEN DE AGUA: 100 L
 AGITACIÓN : 2 HP
 TIEMPO: 10, 20, 30, 40, 50, 60 min

RESULTADOS

Tabla A.IV.1 Resultados de la desagregación de 10 envases multicapa en 100 L de agua

| Cantidad envases | Tiempo (min) | Cantidad de láminas | % Eficiencia |
|------------------|--------------|---------------------|--------------|
| 10 | 10 | 0 | 0,0 |
| 10 | 20 | 0 | 0,0 |
| 10 | 30 | 0 | 0,0 |
| 10 | 40 | 2 | 20,0 |
| 10 | 50 | 2 | 20,0 |
| 10 | 60 | 3 | 30,0 |

FICHA TÉCNICA No: 2

ENSAYO: DESAGREGACIÓN

MUESTRA: D2

OBJETIVO: DESAGREGACIÓN DE PAPEL

PARÁMETROS:

TIPO DE MUESTRA: Envase multicapa
 CANTIDAD DE ENVASES: 20
 VOLUMEN DE AGUA: 100 L
 AGITACIÓN : 2 HP
 TIEMPO: 10, 20, 30, 40, 50, 60 min

RESULTADOS

Tabla A.IV.1 Resultados de la desagregación de 20 envases multicapa en 100 L de agua

| Cantidad envases | Tiempo (min) | Cantidad de láminas | % Eficiencia |
|-------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| 20 | 10 | 0 | 0,0 |
| 20 | 20 | 0 | 0,0 |
| 20 | 30 | 3 | 15,0 |
| 20 | 40 | 5 | 25,0 |
| 20 | 50 | 5 | 25,0 |
| 20 | 60 | 7 | 35,0 |

FICHA TÉCNICA No: 3

ENSAYO: DESAGREGACIÓN

MUESTRA: D3

OBJETIVO: DESAGREGACIÓN DE PAPEL

PARÁMETROS:

TIPO DE MUESTRA: Envase multicapa
 CANTIDAD DE ENVASES: 30
 VOLUMEN DE AGUA: 100 L
 AGITACIÓN : 2 HP
 TIEMPO: 10, 20, 30, 40, 50, 60 min

RESULTADOS

Tabla A.IV.2 Resultados de la desagregación de 30 envases multicapa en 100 L de agua

| Cantidad envases | Tiempo (min) | Cantidad de láminas | % Eficiencia |
|-------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| 30 | 10 | 4 | 13,3 |
| 30 | 20 | 15 | 50,0 |
| 30 | 30 | 10 | 33,3 |
| 30 | 40 | 1 | 3,3 |
| 30 | 50 | 0 | 0,0 |
| 30 | 60 | 0 | 0,0 |

FICHA TÉCNICA No: 4

ENSAYO: DESAGREGACIÓN

MUESTRA: D4

OBJETIVO: DESAGREGACIÓN DE PAPEL

PARÁMETROS:

TIPO DE MUESTRA: Envase multicapa
 CANTIDAD DE ENVASES: 40
 VOLUMEN DE AGUA: 100 L
 AGITACIÓN : 2 HP
 TIEMPO: 10, 20, 30, 40, 50, 60 min

RESULTADOS

Tabla A.IV.3 Resultados de la desagregación de 40 envases multicapa en 100 L de agua

| Cantidad envases | Tiempo (min) | Cantidad de láminas | % Eficiencia |
|-------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| 40 | 10 | 6 | 15,0 |
| 40 | 20 | 18 | 45,0 |
| 40 | 30 | 16 | 40,0 |
| 40 | 40 | 0 | 0,0 |
| 40 | 50 | 0 | 0,0 |
| 40 | 60 | 0 | 0,0 |

ANEXO V**ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN****FICHA TÉCNICA No: 5**

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L5

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0172 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
SOLVENTE: Xileno
TEMPERATURA: Temperatura de ebullición
TIEMPO: 30 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 3,6192 g

FICHA TÉCNICA No: 6

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L6

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,9824 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
SOLVENTE: Xileno
TEMPERATURA: Temperatura de ebullición
TIEMPO: 60 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 2,9580 g

FICHA TÉCNICA No: 7

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L7

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,1091 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Xileno

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 90 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 2,8546 g

FICHA TÉCNICA No: 8

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L8

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0121 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Xileno

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 120 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 2,7892 g

FICHA TÉCNICA No: 9

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L9

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,9931 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Xileno

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 180 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 2,7725 g

FICHA TÉCNICA No: 10

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L10

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0013 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Xileno/Etanol 50 %

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 30 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,8293 g

FICHA TÉCNICA No: 11

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L11

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0229 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
SOLVENTE: Xileno/Etanol 50 %
TEMPERATURA: Temperatura de ebullición
TIEMPO: 60 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,6892 g

FICHA TÉCNICA No: 12

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L12

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,989 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
SOLVENTE: Xileno/Etanol 50 %
TEMPERATURA: Temperatura de ebullición
TIEMPO: 90 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,4629 g

FICHA TÉCNICA No: 13

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L13

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,9708 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
SOLVENTE: Xileno/Etanol 50 %
TEMPERATURA: Temperatura de ebullición
TIEMPO: 120 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,3881 g

FICHA TÉCNICA No: 14

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L14

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0121 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
SOLVENTE: Xileno/Etanol 50 %
TEMPERATURA: Temperatura de ebullición
TIEMPO: 180 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,3794 g

FICHA TÉCNICA No: 15

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L15

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,9793 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Tricloro Benceno

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 30 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 3,9851g

FICHA TÉCNICA No: 16

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L16

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,9891 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Tricloro Benceno

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 60 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 3,3446 g

FICHA TÉCNICA No: 17

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L17

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0012 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Tricloro Benceno

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 90 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 3, 2905 g

FICHA TÉCNICA No: 18

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L18

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0171 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Tricloro Benceno

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 120 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 3, 0912 g

FICHA TÉCNICA No: 19

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L19

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,9809 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
SOLVENTE: Tricloro Benceno
TEMPERATURA: Temperatura de ebullición
TIEMPO: 180 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 2,9089 g

FICHA TÉCNICA No: 20

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L20

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,9953 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
SOLVENTE: Tricloro Benceno/Etanol 50 %
TEMPERATURA: Temperatura de ebullición
TIEMPO: 30 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,8348 g

FICHA TÉCNICA No: 21

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L21

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0049 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Tricloro Benceno/Etanol 50 %

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 60 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,7012 g

FICHA TÉCNICA No: 22

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L22

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0112 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Tricloro Benceno/Etanol 50 %

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 90 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,6823 g

FICHA TÉCNICA No: 23

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L23

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 5,0075 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Tricloro Benceno/Etanol 50 %

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 120 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,6498 g

FICHA TÉCNICA No: 24

ENSAYO: LIXIVIACIÓN

MUESTRA: L24

OBJETIVO: LIXIVIACIÓN DE POLIETILENO

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,9894 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

SOLVENTE: Tricloro Benceno/Etanol 50 %

TEMPERATURA: Temperatura de ebullición

TIEMPO: 180 min

RESULTADOS

MASA FINAL: 4,6221 g

ANEXO VI

ENSAYOS DE FUNDICIÓN

FICHA TÉCNICA No: 25

ENSAYO: Fundición
 MUESTRA: F25
 OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
 TIPO DE MUESTRA: Aluminio
 TEMPERATURA: 700 °C
 TIEMPO: 60 min
 %CARGA FUNDENTE 200 %

Tabla A.VI.1 Composición de carga fundente para ensayos de fundición

| %NaCl | % KCl |
|-------|-------|
| 50 | 50 |

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,6 g

FICHA TÉCNICA No: 26

ENSAYO: Fundición
 MUESTRA: F26
 OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
 TIPO DE MUESTRA: Aluminio
 TEMPERATURA: 750 °C
 TIEMPO: 60 min
 %CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: *Tabla A.VI.1*

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,7 g

FICHA TÉCNICA No: 27

ENSAYO: Fundición
MUESTRA: F27
OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio
TEMPERATURA: 800 °C
TIEMPO: 60 min
%CARGA FUNDENTE 200 %
COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: Tabla A.VI.1

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,7 g

FICHA TÉCNICA No: 28

ENSAYO: Fundición
MUESTRA: F28
OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio
TEMPERATURA: 850 °C
TIEMPO: 60 min
%CARGA FUNDENTE 200 %
COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: Tabla A.VI.1

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,6 g

FICHA TÉCNICA No: 29

ENSAYO: Fundición
MUESTRA: F29
OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio
TEMPERATURA: 900 °C
TIEMPO: 60 min
%CARGA FUNDENTE 200 %
COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: Tabla A.VI.1

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,4 g

FICHA TÉCNICA No: 30

ENSAYO: Fundición
MUESTRA: F30
OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio
TEMPERATURA: 750 °C
TIEMPO: 15 min
%CARGA FUNDENTE 200 %
COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: Tabla A.VI.1

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,1 g

FICHA TÉCNICA No: 31

ENSAYO: Fundición

MUESTRA: F31

OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio

TEMPERATURA: 750 °C

TIEMPO: 30 min

%CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: *Tabla A.VI.1*

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,8 g

FICHA TÉCNICA No: 32

ENSAYO: Fundición

MUESTRA: F32

OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio

TEMPERATURA: 750 °C

TIEMPO: 60 min

%CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: *Tabla A.VI.1*

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,7 g

FICHA TÉCNICA No: 33

ENSAYO: Fundición

MUESTRA: F33

OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio

TEMPERATURA: 750 °C

TIEMPO: 90 min

%CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: *Tabla A.VI.1*

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,7 g

FICHA TÉCNICA No: 34

ENSAYO: Fundición

MUESTRA: F34

OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio

TEMPERATURA: 750 °C

TIEMPO: 30 min

%CARGA FUNDENTE 300 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: *Tabla A.VI.1*

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,5 g

FICHA TÉCNICA No: 35

ENSAYO: Fundición
MUESTRA: F35
OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio
TEMPERATURA: 750 °C
TIEMPO: 30 min
%CARGA FUNDENTE 400 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: Tabla A.VI.1

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,3 g

FICHA TÉCNICA No: 36

ENSAYO: Fundición
MUESTRA: F36
OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio
TEMPERATURA: 750 °C
TIEMPO: 30 min
%CARGA FUNDENTE 0 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: Tabla A.VI.1

RESULTADOS

MASA FINAL: 0 g

FICHA TÉCNICA No: 37

ENSAYO: Fundición
 MUESTRA: F37
 OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
 TIPO DE MUESTRA: Aluminio
 TEMPERATURA: 750 °C
 TIEMPO: 30 min
 %CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE:

Tabla A.VI.2 Composición de carga fundente para ensayos de fundición con adición de 5 % de KF

| %NaCl | % KCl | %KF |
|-------|-------|-----|
| 47,5 | 47,5 | 5 |

RESULTADOS

MASA FINAL: 1 g

FICHA TÉCNICA No: 38

ENSAYO: Fundición
 MUESTRA: F38
 OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 2 g
 TIPO DE MUESTRA: Aluminio
 TEMPERATURA: 750 °C
 TIEMPO: 30 min
 %CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE:

Tabla A.VI.3 Composición de carga fundente para ensayos de fundición con la adición 10 % de KF

| %NaCl | % KCl | %KF |
|-------|-------|-----|
| 45 | 45 | 10 |

RESULTADOS

MASA FINAL: 1 g

FICHA TÉCNICA No: 39

ENSAYO: Fundición
MUESTRA: F39
OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,5 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
TEMPERATURA: 750 °C
TIEMPO: 30 min
%CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: Tabla A.VI.1

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,2 g

FICHA TÉCNICA No: 40

ENSAYO: Fundición
MUESTRA: F40
OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,5 g
TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno
TEMPERATURA: 750 °C
TIEMPO: 30 min
%CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: Tabla A.VI.2

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,3 g

FICHA TÉCNICA No: 41

ENSAYO: Fundición

MUESTRA: F41

OBJETIVO: Fundición de aluminio

PARÁMETROS:

MASA INICIAL: 4,5 g

TIPO DE MUESTRA: Aluminio/Polietileno

TEMPERATURA: 750 °C

TIEMPO: 30 min

%CARGA FUNDENTE 200 %

COMPOSICIÓN DE CARGA FUNDENTE: *Tabla A.VI.3*

RESULTADOS

MASA FINAL: 0,3 g

ANEXO VII

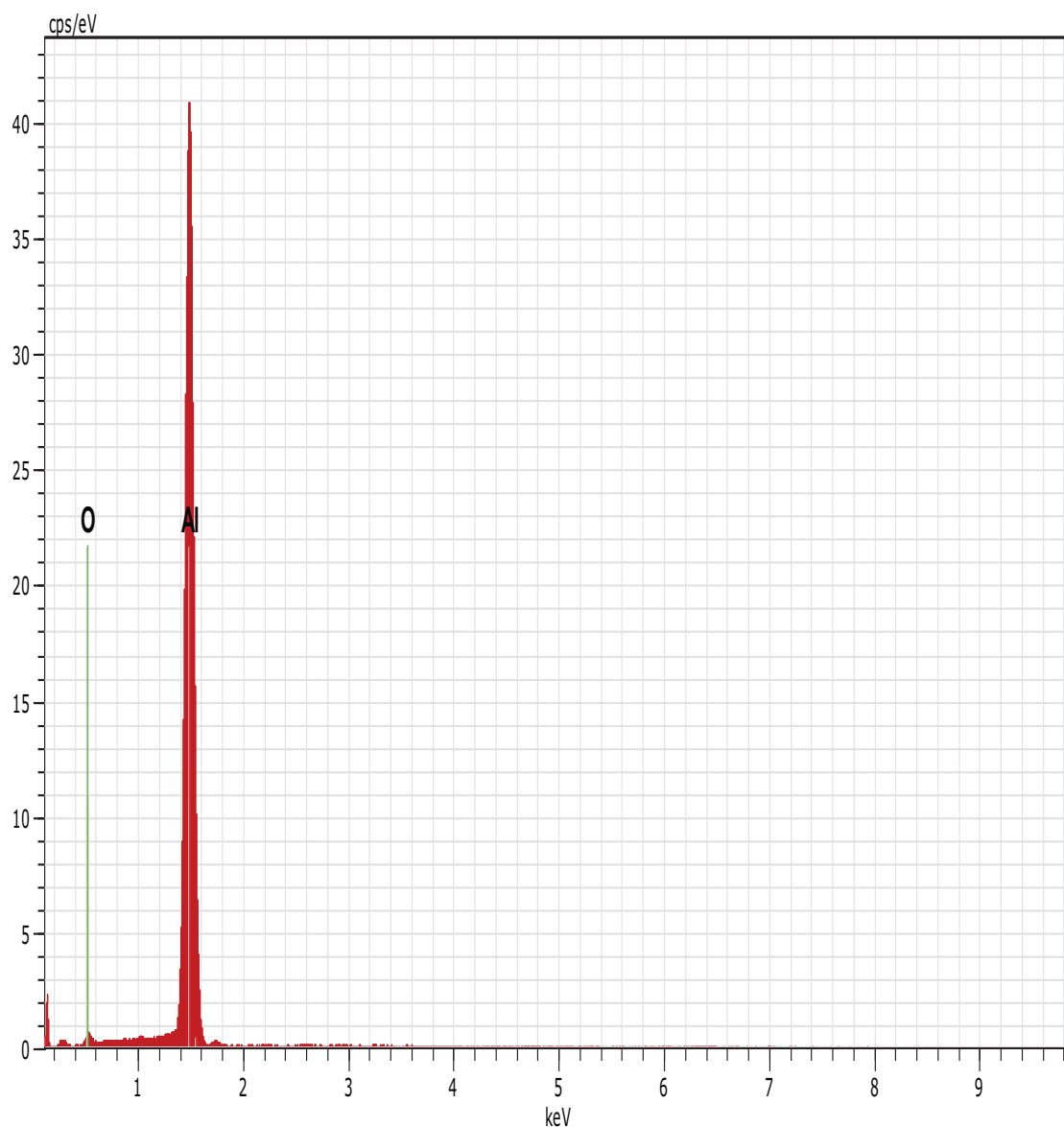
RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRONICA
DE BARRIDO CON ANALIZADOR DE RAYOS X

Figura A.VII.1 Resultado de análisis químico semicuantitativo mediante analizador de rayos X de microscopio electrónico para región observada a 200 aumentos

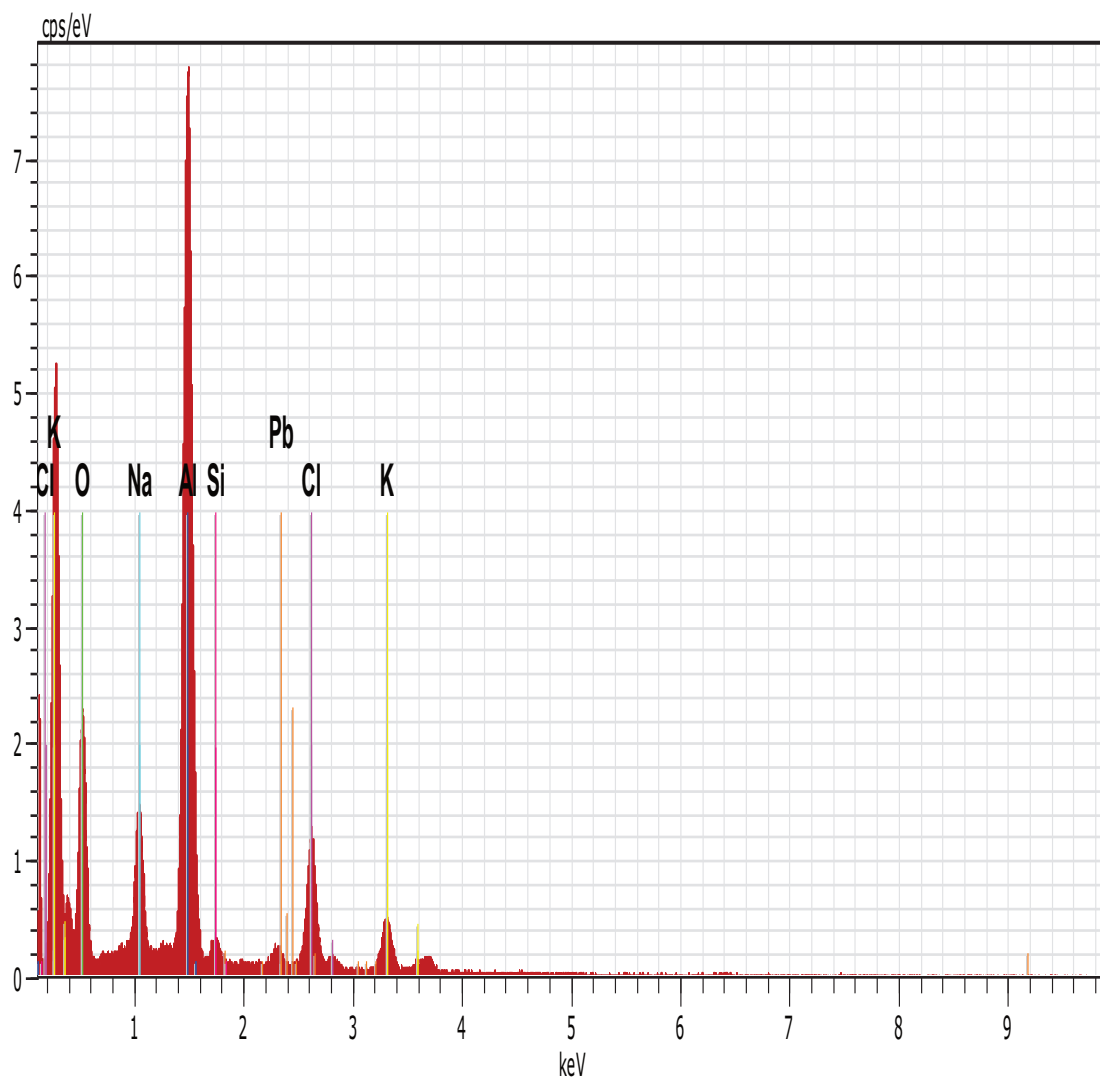


Figura A.VII.2 Resultado de análisis químico semicuantitativo mediante analizador de rayos X de microscopio electrónico para región observada a 3000 aumentos

ANEXO VIII

DIFRACTOGRAMA DE LA MUESTRA DE ALUMINIO FUNDIDO

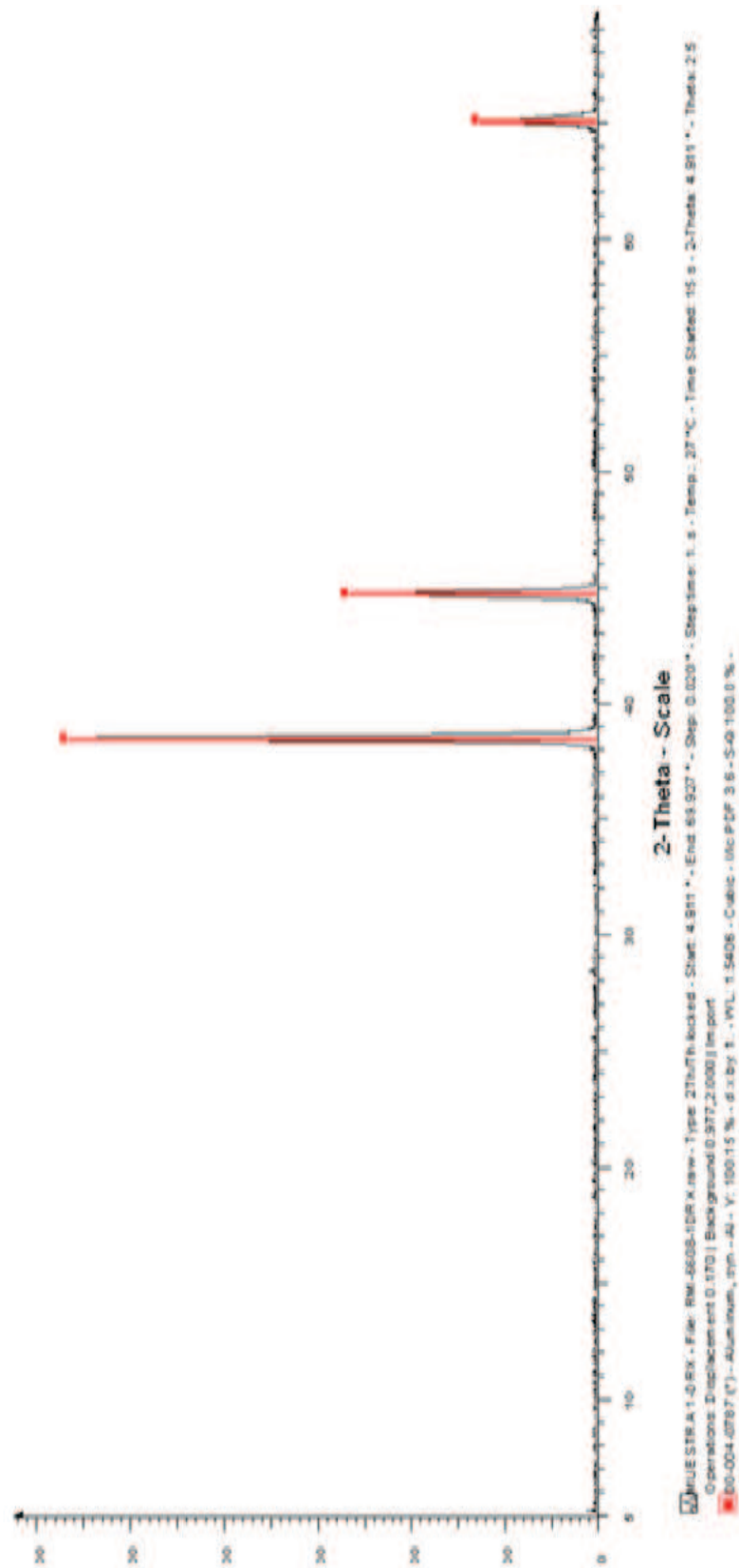


Figura A.VIII.1 Difractograma de la muestra de aluminio fundido