ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

RECUPERACIÓN DE ALUMINIO DE LOS ENVASES Y EMPAQUES USADOS POR LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y FARMACÉUTICA

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DE GRADO DE MÁSTER (MSc.) EN METALURGIA EXTRACTIVA Y MEDIO AMBIENTE

ING. DIANA ENDARA DRANICHNIKOVA
nicosmoth@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ERNESTO DE LA TORRE CHAUVIN.
etorre@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2008.

© Escuela Politécnica Nacional (2008)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo Diana Endara Dranichnikova, 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.

_____

Ing. Diana Endara D.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Ingeniera Diana Endara Dranichnikova, bajo mi supervisión.

_____

Ing. Ernesto de la Torre Ch.
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero de la Cooperación Técnica Belga (CTB), y se ejecutó en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme puesto en este lugar y rodeada de toda la gente a la que quiero mucho.

De manera muy especial agradezco a Ernesto de la Torre, director de mi tesis, por haberme guiado en la realización de este trabajo y por sobre todo por haberme abierto las puertas del Demex y hacerme comprender que en la vida todo es posible cuando uno se lo propone, que siempre hay que seguir luchando por aprender nuevas cosas para ponerlas en práctica en beneficio de los demás. También a Alicia Guevara por la ayuda brindada y por siempre estar dispuesta a dar un consejo cuando uno más lo necesita. Al Ingeniero Marcelo Lozada por todos los conocimientos impartidos y su paciencia.

A toda mi familia, a mis papis y a mis ñaños, que sin ellos no estaría donde estoy, sin su apoyo en todo momento difícil de la vida.

Muy en especial a Andrés, el amor de mi vida, la persona que siempre ha estado cuando lo necesito, que ha sabido comprenderme y amarme de una manera única, y con quien hemos formado a la persona más hermosa de este mundo: nuestro Nico.

A mi familia política, Ramiro, Margarita, Lucía, Pancho, Pablo, Nena, José y Augusto, por haberme recibido como una más de ustedes, muchas gracias por todo.

Un agradecimiento muy especial a mi familia Demex, a la que quiero con todo mi corazón porque ellos me han visto crecer profesionalmente y me han sabido aconsejar en este camino que todavía falta por seguir, mis amigos Maguita, Verito, Evelyncita, Kleberiño, Michelita, Juanito (gracias por compartir conmigo tu amistad y el día a día en el trabajo).

A mis mejores amigas de todo el mundo, “brujitas” Belencita y Susy, gracias por todo el apoyo que siempre me dan, por haber compartido y seguir compartiendo todo lo que esta vida nos ha dado.

A todos los amigos, que aunque ya no estemos juntos, siempre serán parte importante para mí.

A todos los tesistas que han pasado por el Demex, por la paciencia y la amistad brindada.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la razón de mi vida, la persona que me hace seguir adelante cada día aunque a veces sienta que nada sale bien, a mi pequeño tesorito, angelito que Diosito me mandó para hacer de mi vida la mejor.

Por ti mi chiquito, siempre seguiré adelante.

A ti, mi Nico, Te Amo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PÁGINA

RESUMEN **xiii**

INTRODUCCIÓN **xiv**

1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS **1**

1.1. Envases Tetra Pak 1
1.1.1. Generalidades del Tetra Pak 1
1.1.2. Materias primas de envases Tetra Pak tipo Tetra Brick 3
1.1.2.1. *Cartón o papel dúplex* 3
1.1.2.2. *Polietileno* 3
1.1.2.3. *Aluminio* 4
1.1.2.4. *Tintas* 4
1.1.3. Elaboración del los envases Tetra Pak 4
1.1.4. Alternativas de reciclaje de los envases Tetra Pak 6
1.1.4.1. *Incineración con recuperación de energía* 6
1.1.4.2. *Fabricación de planchas de aglomerado* 7
1.1.4.3. *Proceso de hidropulper* 9
1.1.4.3.1. *Extrusión del compósito polietileno-aluminio* 11
1.1.4.3.2. *Proceso de Termo prensado o Termo formado* 12
1.1.4.3.3. *Plasma Térmico* 14

1.2. Empaques tipo “Blisters” 18
1.2.1 Generalidades de los empaques tipo Blisters 18
1.2.1.1. *Blister* 18
1.2.1.2. *Skin Pack* 18
1.2.1.3. *Bubble o Ampolla* 19
1.2.2 Materias primas de empaques tipo “Blister” 19
1.2.2.1. *Policloruro de vinilo* 19
1.2.1.1.1. *Películas rígidas de PVC* 21
1.2.1.1.2. *Películas semirígidas de PVC* 22
1.2.1.1.3. *Películas flexibles de PVC* 22
1.2.3. Alternativas de proceso de empaques tipo Blister 23
1.2.3.1.*Recuperación de PVC de materiales compuestos por disolución y precipitación* 23
1.2.3.1.1. *Pre- tratamiento* 24
1.2.3.1.2. *Disolución* 24
1.2.3.1.3. *Separación del material insoluble* 25
1.2.3.1.4. *Precipitación* 26
1.2.3.1.5. *Recuperación del solvente* 26
1.2.3.1.6. *Secado* 27
1.2.3.2.*Combustión en dos etapas de un residuo de PVC con recuperación de ácido clorhídrico* 27

PÁGINA

1.3. Pirolisis 30
1.3.1. Pirolisis aplicada al tratamiento de residuos 30
1.3.1.1. *Fracción sólida* 30
1.3.1.2. *Fracción líquida* 30
1.3.1.3. *Fracción gaseosa* 31
1.3.2. Ventajas y desventajas de la pirolisis aplicada al tratamiento de residuos 31

1.4. Fusión del aluminio 33
1.4.1. Metalurgia del aluminio 33
1.4.2. Características de la fusión del aluminio 34
1.4.3. Pérdidas de aluminio durante la fusión 38

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL 40

2.1 Introducción 40

2.2 Metodología experimental para la recuperación de aluminio de los envases Tetra Pak 40
2.2.1 Caracterización de la materia prima tipo Tetra Pak 42
2.2.2. Ensayos de Hidroatrición de los envases Tetra Pak 43
2.2.3. Ensayos de Pirolisis de los envases Tetra Pak 44
2.2.3.1.Caracterización de los productos del proceso de pirolisis de los envases Tetra Pak 45
2.2.4. Ensayos de Fusión de envases Tetra Pak 46
2.2.4.1. Fusión de productos del proceso Hidroatrición-Pirolisis de envases Tetra Pak 46
2.2.4.2.Fusión de productos del proceso Hidroatrición-Incineración de envases Tetra Pak 46
2.2.4.3.Fusión de productos del proceso de Pirolisis de envases Tetra Pak 50

2.3 Metodología Experimental para la recuperación de aluminio de los empaques tipo “Blister” 51
2.3.1 Caracterización de la materia prima tipo Blister 52
2.3.1.1. *Caracterización física de los empaques tipo Blister* 52
2.3.1.2. *Caracterización química de los empaques tipo Blister* 53
2.3.1.3. *Caracterización mineralógica de los empaques tipo Blister* 53
2.3.2. Ensayos de Disolución del plastificante de empaques tipo Blister 53
2.3.3. Ensayos de Pirolisis de empaques tipo Blister 54
2.3.4. Ensayos de Fusión de empaques tipo Blister 55

PÁGINA

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 57

3.1 Resultados caracterización de envases Tetra Pak 57
3.1.1. *Resultados caracterización física de envases Tetra Pak* 57
3.1.2. *Resultados caracterización química de envases Tetra Pak* 57
3.1.3. *Resultados caracterización mineralógica de envases Tetra Pak* 58

3.2 Resultados ensayos de hidroatrición de envases Tetra Pak 59
3.2.1. Resultados ensayos de pirolisis de productos obtenidos de hidroatrición de envases Tetra Pak 60
3.2.1.1. *Resultados caracterización físico-química y Mineralógica de AL-PE pirolizado* 61

3.3. Resultados ensayos de pirolisis de los envases Tetra Pak 63
3.3.1. Resultados caracterización físico, química y mineralógica de los productos de pirolisis de envases Tetra Pak 64

3.4. Resultados ensayos de fusión de envases Tetra Pak 66
3.4.1. Resultados de fusión de productos del proceso hidroatrición – pirolisis 66
3.4.2. Resultados de fusión de productos del proceso hidroatrición – Incineración 68
3.4.3. Resultados de fusión de productos del proceso de pirolisis 78

3.5. Resultados caracterización de empaques tipo “Blister” 84
3.5.1. Resultados caracterización física de empaques tipo blister 84
3.5.2. Resultados caracterización química de empaques tipo blister 85
3.5.3. Resultados caracterización mineralógica de empaques tipo blister 86

3.6. Resultados ensayos de disolución del plastificante de los empaques tipo Blister 87

3.7. Resultados ensayos de pirolisis de empaques tipo blister 92

3.8. Resultados ensayos de fusión de empaques tipo blister 93
3.8.1. Resultados análisis químico Ensayo 2 de fusión de empaques Tipo blister 95
3.8.2. Resultados análisis químico Ensayo 3 de fusión de empaques Tipo blister 96
3.8.3. Resultados análisis químico Ensayo 4 de fusión de empaques Tipo blister 97
3.8.4. Resultados análisis químico Ensayo 5 de fusión de empaques Tipo blister 98
3.8.5. Resultados análisis químico Ensayo 6 de fusión de empaques Tipo blister 99
3.8.6. Resultados análisis químico Ensayo 7 de fusión de empaques Tipo blister 99

PÁGINA

3.8.7. Resultados análisis químico Ensayo 8 de fusión de empaques Tipo blister 100

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 102

4.1. Conclusiones 102

4.2. Recomendaciones 103

BIBLIOGRAFÍA 104

ANEXOS 106

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

Tabla 1.1: Propiedades del polietileno obtenido luego del proceso de extrusión 12

Tabla 2.1: Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso Hidroatrición – pirolisis de envases Tetra Pak 46

Tabla 2.2: Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso Hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, CaF_2, Fe 47

Tabla 2.3: Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso Hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, NaF, Fe 48

Tabla 2.4: Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso Hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, NaF, Fe, CaF_2, Na_2CO_3, NaCl 49

Tabla 2.5: Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso Hidroatrición – incineración, con varias cargas fundentes 49

Tabla 2.6: Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso Pirolisis 50

Tabla 2.7: Condiciones de los ensayos de pirolisis de empaques tipo “Blister” 55

Tabla 2.8: Condiciones de fusión de los empaques tipo “Blister” 56

Tabla 3.1: Humedad, cenizas, volátiles y carbón fijo de los envases Tetra Pak 57

Tabla 3.2: Lectura en análisis por absorción atómica de cenizas de envases Tetra Pak 58

Tabla 3.3: Análisis mineralógico de cenizas de envases Tetra Pak 58

Tabla 3.4: Condiciones de pirolisis de producto obtenido luego del proceso de hidropulpeado de envases Tetra Pak (AL-PE) 60

Tabla 3.5: Caracterización física del producto AL-PE pirolizado 61

Tabla 3.6: Análisis químico por absorción atómica del producto AL-PE Pirolizado 62

Tabla 3.7: Análisis mineralógico del producto obtenido del proceso de Pirolisis 62

PÁGINA

Tabla 3.8:	Condiciones de operación en el ensayo de pirolisis, y recuperación de láminas metálicas	63
Tabla 3.9:	Caracterización física de láminas metálicas producto del ensayo de pirolisis	64
Tabla 3.10:	Análisis mineralógico de cenizas del producto obtenido en el proceso de pirolisis	65
Tabla 3.11:	Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos Del proceso hidroatrición – pirolisis	66
Tabla 3.12:	Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos Del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, CaF_2, Fe	68
Tabla 3.13:	Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos Del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, NaF, Fe	72
Tabla 3.14:	Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos Del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, NaF, Fe, CaF_2, Na_2CO_3, NaCl	75
Tabla 3.15:	Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, con varias cargas fundentes	77
Tabla 3.16:	Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos del proceso de pirolisis	79
Tabla 3.17:	Caracterización física de empaques tipo “Blister”	84
Tabla 3.18:	Análisis por absorción atómica de empaques tipo “Blister”	86
Tabla 3.19:	Análisis mineralógico de cenizas de empaques tipo “Blister”	86
Tabla 3.20:	Porcentaje láminas metálicas obtenidas en el ensayo de disolución de empaques tipo “Blister”	88
Tabla 3.21:	Resultados ensayos de pirolisis de empaques tipo “Blister”	93
Tabla 3.22:	Porcentaje de fase metálica de ensayos de fusión de empaques tipo “Blister”	94
Tabla 3.23:	Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 2	95

PÁGINA

Tabla 3.24:	Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 3	96
Tabla 3.25:	Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 4	97
Tabla 3.26:	Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 5	98
Tabla 3.27:	Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 8	100

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1.1:	Bobina para la elaboración de envases Tetra Pak	5
Figura 1.2:	Rollo de Tetra Pak	5
Figura 1.3:	Tetra Pak listo para su distribución	5
Figura 1.4:	Diagrama del proceso para la fabricación de aglomerado a partir De envases Tetra Brick	9
Figura 1.5:	Productos de planchas de aglomerado	9
Figura 1.6:	Productos obtenidos luego del proceso de hidropulper	11
Figura 1.7:	Productos obtenidos en el proceso de termo prensado	14
Figura 1.8:	Planta de Plasma Piloto en Brasil	16
Figura 1.9.	Lingotes de aluminio obtenidos en el proceso de plasma térmico	17
Figura 1.10:	Esquema de obtención del PVC en Solvay Martorell	21
Figura 1.11.	Etapa de pre-tratamiento del proceso Vinyloop	24
Figura 1.12.	Etapa de disolución del proceso Vinyloop	25
Figura 1.13.	Etapa de separación del material insoluble del proceso Vinyloop	25
Figura 1.14.	Etapa de precipitación del proceso Vinyloop	26
Figura 1.15.	Etapa de recuperación del solvente del proceso Vinyloop	26
Figura 1.16.	Etapa de secado del proceso Vinyloop	27
Figura 1.17.	Esquema del proceso combustión en dos etapas de un residuo De PVC con recuperación de ácido clorhídrico	28
Figura 2.1:	Metodología experimental del proceso a seguir para la recuperación De aluminio de los envases Tetra Pak	41
Figura 2.2:	Reactor utilizado para el ensayo de hidroatrición de empaques Tetra Pak	43

PÁGINA

Figura 2.3:	Horno Nichols Herreshoff	44
Figura 2.4:	Diagrama de flujo de la metodología experimental utilizada para la recuperación de aluminio de los empaques tipo “Blister”	51
Figura 2.5:	Fotografía de residuo metálico y no metálico obtenido del proceso de pirolisis de los empaque tipo “Blister”	55
Figura 3.1:	Fotografía de los productos obtenidos del proceso de hidropulper	59
Figura 3.2:	Fotografía del producto obtenido del proceso de pirolisis	61
Figura 3.3:	Fotografía de la materia prima y del producto obtenido del Proceso de pirolisis	63
Figura 3.4:	Fotografía del producto obtenido en el proceso de pirolisis	64
Figura 3.5:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – pirolisis como indica el Ensayo 1	67
Figura 3.6:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – pirolisis como indica el Ensayo 2	67
Figura 3.7:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – pirolisis como indica el Ensayo 3	67
Figura 3.8:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 4	70
Figura 3.9:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 5	70
Figura 3.10:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 6	70
Figura 3.11:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 7	71
Figura 3.12:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 8	71
Figura 3.13:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 9	72
Figura 3.14:	Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 10	73

PÁGINA

Figura 3.15: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 11 74

Figura 3.16: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 12 74

Figura 3.17: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 13 74

Figura 3.18: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 14 76

Figura 3.19: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 15 76

Figura 3.20: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 16 77

Figura 3.21: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 17 78

Figura 3.22: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del Proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 18 78

Figura 3.23: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 19 80

Figura 3.24: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 20 81

Figura 3.25: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 21 81

Figura 3.26: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 22 82

Figura 3.27: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 23 82

Figura 3.28: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 24 83

Figura 3.29: Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 25 83

PÁGINA

Figura 3.30: Espectro infrarrojo de muestra plástica de empaques tipo “Blister” superpuesta al espectro estándar de un co-polímero PVC – acetato de vinilo 85

Figura 3.31: Fotografía de los productos obtenidos en el proceso de disolución 87

Figura 3.32: Fotografía de tipos diferentes de láminas plásticas de empaques tipo “Blister” 89

Figura 3.33: Espectro infrarrojo de la muestra 1 (blanca) luego del proceso de disolución 89

Figura 3.34: Espectro infrarrojo de la muestra 2 (anaranjada) luego del proceso de disolución 90

Figura 3.35: Espectro infrarrojo de muestra plástica M1 (Blanca) obtenida luego del proceso de disolución (azul) y Espectro Infrarrojo de muestra plástica inicial (negro) 91

Figura 3.36: Espectro Infrarrojo de muestra plástica M2 (Anaranjada) obtenida luego del proceso de disolución (negro) y Espectro Infrarrojo co polímero PVC – acetato de vinilo (azul) 92

Figura 3.37: Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 2 95

Figura 3.38: Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 3 96

Figura 3.39: Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 4 97

Figura 3.40: Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 5 98

Figura 3.41: Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 6 99

Figura 3.42: Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 7 100

Figura 3.43: Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 8 101

ÍNDICE DE ANEXOS

PÁGINA

ANEXO I
Caracterización física de la materia prima 106

ANEXO II
Fichas técnicas de pruebas de pirolisis 107

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue optimizar el proceso de recuperación de aluminio de alta pureza de los envases Tetra Pak, además de plantear un proceso de recuperación de aluminio de los empaques post- consumo de la industria farmacéutica conocidos como “Blisters”.

Para la recuperación de aluminio de los envases Tetra Pak se determinó un proceso de reciclaje mediante un tratamiento de hidro-atrición, pirolisis y fusión de láminas metálicas de aluminio, variando la carga fundente utilizada para obtener el mayor porcentaje de recuperación.

El proceso planteado para la recuperación de aluminio de los empaques tipo “Blisters”, fue llevado a cabo mediante la separación de la lámina de aluminio por procesos de disolución y pirolisis, para luego mediante un tratamiento de fusión variando la carga fundente utilizada se obtenga aluminio puro.

Las materias primas, así como también los productos obtenidos en los diferentes procesos planteados fueron caracterizadas por Espectrometría de Absorción Atómica para conocer su composición química y mediante Difracción de Rayos X para conocer su composición mineralógica.

Se concluyó que el proceso para la recuperación de aluminio de los envases Tetra Pak se optimiza si se trabaja mediante un tratamiento de pirolisis – fusión, obteniéndose recuperaciones del 97% sin la adición de carga fundente.

Además, se concluyó que en el proceso de recuperación de aluminio de los empaques tipo “Blisters”, es posible obtener recuperaciones del 89,9% mediante un tratamiento de fusión – extracción manual de la lámina de aluminio, sin la adición de carga fundente.

INTRODUCCIÓN

Los envases post- consumo de la industria alimenticia y farmacéutica, una vez empleados y al no ser reutilizables, se los considera un residuo. Entre las posibilidades de eliminación tenemos que estos pueden ser depositados en vertederos controlados, pueden ser incinerados, o en el mejor de los casos reciclados. En el caso de ser eliminado al vertedero el impacto generado por este tipo de envases es nulo ya que se comportan prácticamente como residuos inertes, sin embargo se desperdician los materiales que pueden ser utilizados en un proceso de incineración o que a través del reciclaje podrían ser recuperados.

Cada uno de estos envases posee varios componentes muy importantes a ser recuperados, el reciclaje de aluminio produce beneficios tanto ambientales como económicos, ya que el consumo de energía para este es de 15 a 20 veces menor que la producción de aluminio de las minas de bauxita.

Actualmente existe una nueva tecnología de recuperación de aluminio de los envases alimenticios o Tetra Pak, basada en la utilización de un horno a plasma, en donde no se utiliza combustibles fósiles para dar la energía necesaria para la fundición, con lo cual se evita tener altas pérdidas de oxidación y adición de sales fundentes corrosivas para los equipos y tóxicas para el ser humano.

En cuanto a los envases farmacéuticos o Blisters, su reciclaje se vuelve complicado debido a la presencia de elementos clorados que hacen imposible su tratamiento vía incineración.

El presente trabajo de investigación se realiza para estudiar la factibilidad de optimizar la recuperación del aluminio presente en los envases post – consumo

de la industria alimenticia y farmacéutica, mediante procesos de pirolisis - fusión, incineración – fusión y disolución – fusión.

La fusión del aluminio presenta grandes inconvenientes en hornos convencionales que trabajan con combustibles fósiles, debido a la tendencia a absorber gases de combustión, que dan como resultado un producto impuro.

Así mismo, debido a la facilidad con que el aluminio se alea a otros metales su reciclaje se convierte en un proceso complicado de llevar por la cantidad de impurezas a tratar para su total recuperación.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. ENVASES TETRA PAK

1.1.1. GENERALIDADES DEL TETRA PAK

El uso de la marca Tetra Pak está íntimamente ligado con el producto “estrella” de esta empresa. Tetra Pak es en realidad el nombre de la empresa que realiza este tipo de envases, los cuales tienen diferente nombre según su forma, así:

- Tetra Clásico
- Tetra Brik
- Tetra Prisma
- Tetra Angular
- Tetra Fino
- Tetra Rex
- Tetra Top
- Tetra Recart

En Sudamérica las plantas se encuentran ubicadas en Colombia y Perú, y estas solo venden el producto Tetra Pak del tipo Tetra Brick, este envase tiene una lámina de aluminio, cartón y polietileno (Inche Mitma *et al.*, 2007).

Desde que, en los años 50, apareció el envase de brik, denominado como cartón para bebidas, ha presentado un desarrollo muy importante en el sector de la comercialización de productos alimenticios líquidos. Las características que más han ayudado a su expansión son su peso y su forma rectangular, que facilita su almacenaje y transporte, su capacidad de protección y conservación del producto, su forma de llenado, basada en formar un tetraedro a partir de una bobina de papel recubierta de plástico y, su sellado final.

En la actualidad, en Europa se envasan a diario más de 100 millones de litros de productos lácteos, aceite, salsas, vino, agua, etc., siendo el brik el envase más empleado para zumos y leche debido a su comodidad, resistencia,

seguridad, protección y bajo coste en la distribución de productos líquidos, se encuentra hoy en día en pleno auge y expansión, por lo que la cantidad de residuos generados de este envase también se encuentra en ascenso.

Las características de este producto se pueden dividir en función de su comercialización y su conservación. Respecto a su comercialización, el brik ha demostrado ser un envase robusto, resistente a los golpes, ocupa un espacio mínimo en la distribución del envase vacío, al presentarse en forma de paralelepípedo y lleno de producto, minimiza los espacios vacíos y además mejora la comunicación y el diseño de etiquetados. En relación con su conservación, su composición protege al producto del aire, la luz y las bacterias. Además, si el envase es aséptico, no requiere refrigeración para su conservación.

El cartón para bebidas se compone de varios materiales superpuestos en capas, cada una de las cuales aporta una función y propiedad concreta al conjunto del envase. En la actualidad, tanto el peso como el volumen del envase se encuentran reducidos al mínimo, tras muchos años de investigación; en un periodo de 20 años, el peso de un cartón se ha reducido un 20%, pesando en la actualidad un envase de un litro entre 25 y 28 gramos (Revista Ambientum, 2003).

La materia prima utilizada en esta investigación, son los envases Tetra Pak tipo Tetra Brick.

1.1.2. MATERIAS PRIMAS DE ENVASES TETRA PAK TIPO TETRA BRIK

Los envases Tetra Brik están compuestos de varias capas de material; papel duplex (75%), polietileno de baja densidad (20%) y aluminio (5%).

Estas capas crean una barrera que impide la entrada de la luz, aire, agua y microorganismos. Al mismo tiempo no permite que el aroma de los alimentos salga del embalaje. Una protección contra la luz es muy importante, pues esta

destruye la vitamina C y la vitamina B presentes en los alimentos, principalmente leche y jugos. El oxígeno presente en el aire produce una reacción de oxidación causando una reducción de calidad de los productos (Tetra Pak España, 2008).

Los envases Tetra Brik están compuestos por:

1.1.2.1. CARTÓN O PAPEL DUPLEX

Cerca del 75-80% de un envase Tetra Brik es cartón (en peso).
Es la principal materia prima para la fabricación de los envases. El suministro de papel proviene de la madera de bosques industrializados ubicados en Brasil y bosques templados gestionados mediante el concepto de desarrollo sustentable. Un árbol de $1m^3$ proporciona pasta de papel suficiente para fabricar 13.300 envases de litro (Conferencia envases, 2008).

1.1.2.2. POLIETILENO

El polietileno representa el 15-20% del peso del cartón para bebidas.
El polietileno proporciona estanqueidad al contenido líquido y mantiene unidos los diferentes materiales del envase. La fina capa de polietileno externa protege el papel de la humedad, mientras que la capa doble de polietileno en el interior del envase logra sellarlo herméticamente. También, separa los alimentos del contacto directo con la lámina de aluminio. Se utiliza polietileno de baja densidad, que ofrece el máximo rendimiento utilizando una cantidad mínima de material (12 micras de espesor) (Conferencia envases, 2008).

1.1.2.3. ALUMINIO

Representa un máximo del 5% del peso del cartón para bebidas.
El envase aséptico (de larga duración) necesita una barrera extremadamente eficaz contra el oxígeno, la luz y aromas y sabores extraños.

La hoja de aluminio permite el almacenamiento seguro a temperatura ambiente de los productos envasados.

La hoja de aluminio es una excelente barrera a pesar de su delgadez, el espesor de la hoja se ha reducido de 9 hasta 6,5 micras en los últimos 15 años (Tetra Pak España, 2008; Conferencia envases, 2008).

1.1.2.4. TINTAS

Tetra Pak usa tintas de base agua, con pigmentos orgánicos y sin metales pesados (Tetra Pak España, 2008).

1.1.3. ELABORACIÓN DE LOS ENVASES TETRA PAK

Los envases de Tetra Pak son producidos en grandes bobinas como las indicadas en la Figura 1.1. Una misma bobina contiene varios rollos con secuencias de envases. (Composición y reciclaje del Tetra Brik, 2007). Cada rollo contiene 8000 envases de un litro y cada pallet 40000 envases. (Conferencia envases, 2008).

Figura 1. 1. Bobina para la elaboración de envases Tetra Pak.

Figura 1.2. Rollo de Tetra Pak

Figura 1.3. Tetra Pak listo para su distribución.

Cada rollo de una bobina recibe una numeración (1 al 5) que permite identificar en qué posición de la bobina fue producido un determinado envase.

Para un Tetra Brick de 1 litro se necesita de 20 gramos de papel, 5,7 gramos de polietileno y 1,5 gramos de aluminio (Composición y reciclaje del Tetra Brik, 2007).

1.1.4. ALTERNATIVAS DE RECICLAJE DE LOS ENVASES TETRA PAK

Debido al consumo en aumento de este tipo de envases se ha visto la manera de buscar varios procesos de reciclaje, para así recuperar y/o aprovechar los elementos presentes en estos.

Entre las alternativas encontradas, se tienen:

- Incineración con recuperación de energía
- Fabricación de planchas de aglomerado
- Proceso de hidropulper
    - Extrusión compósito polietileno – aluminio
    - Termo prensado o Termo formado
    - Plasma Térmico

1.1.4.1. INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Los envases de Tetra Pak se pueden incinerar, con tecnología y procesos limpios, para generar energía (electricidad o calefacción), porque el cartón y polietileno, principales componentes de estos envases, son valiosas fuentes de combustible. Por ejemplo, dos toneladas de envases de Tetra Pak tienen el mismo contenido energético que una tonelada de petróleo.

1.1.4.2. FABRICACIÓN DE PLANCHAS DE AGLOMERADO

La fabricación de distintos tipos de planchas de aglomerado para los más diversos usos es la solución elegida mayoritariamente en países asiáticos.

Las ventajas de este aglomerado sobre los convencionales son la resistencia a los elementos, a causa de su impermeabilidad y el no precisar de colas para su fabricación (obviándose cualquier problema de formaldehídos), ya que el polietileno que se encuentra en los envases Tetra Brik actúa de aglomerante, al fundirse tras ser colocados los envases previamente troceados en una prensa de calor.

Así existen fábricas de un material llamado Yekpan en Turquía, que ha alcanzado, en sólo cuatro años, una cuota del 20% de reciclado respecto de los

envases Tetra Brik consumidos allí y cuenta con una capacidad de 1.350 toneladas / año.

En Pakistán, el producto final se denomina Chiptec, al igual que en China, donde ya existen tres fábricas de Chiptec y está apunto de inaugurarse la cuarta en Shenzen, con una capacidad de 9.000 toneladas / año, lo que llevará la capacidad total hasta más de 20.000 toneladas / año. La Agencia China de Protección Ambiental incluyó al Chiptec en 1997 como una de las tecnologías recomendables, a escala nacional, para la protección del medio ambiente. En 1998 Chiptec pasó con éxito el examen conjunto realizado por el Comité Estatal para la Ciencia y la Tecnología, la Oficina Estatal de Materiales de Construcción y la Agencia Estatal de Protección Ambiental.

Por su parte, en Argentina también se ha comercializado este tipo de material bajo la denominación T-Plak comercializada por la empresa Rezagos Industriales, con la que ya se han construido dos casas completas.
En Europa, la tradición comenzó en Alemania donde el Tectan sigue siendo fabricado por la empresa EVD de Limburg. Con sus planchas se fabrican muebles, suelos, y otros, a las cuales se le puede dar muchas formas, incluso curvas, ofreciendo a los diseñadores un amplio horizonte para crear interesantes objetos (Tetra Pak España, 2008).

El procedimiento usado para la fabricación de planchas de aglomerado a partir de cartones para bebidas usados, es el siguiente:

- Los cartones triturados se lavan, se secan y se extienden en una capa del espesor deseado.

- Después se ponen en una prensa y se calientan a unos 170º C.

- El calor funde el contenido de polietileno (PE) que une la fibra densamente comprimida y los fragmentos de aluminio en una matriz elástica.

- La matriz resultante se enfría después, rápidamente, formando un duro aglomerado con una superficie brillante e impermeable.

- El polietileno es un agente de unión muy eficaz, de manera que no es necesario añadir cola o productos químicos como el formaldehído de urea que se usa para mantener unidos los aglomerados y chapas convencionales de madera.

Un diagrama del proceso utilizado para la fabricación de planchas de aglomerado a partir de cartones para bebidas usados, se indica en la Figura 1.4.

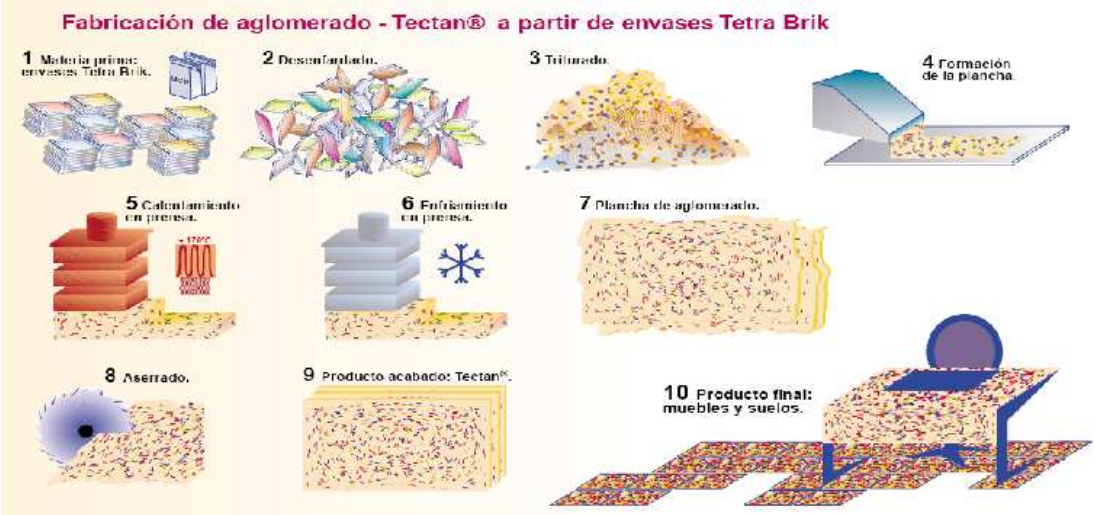

Figura 1. 4. Diagrama del proceso para la fabricación de aglomerado a partir de envases Tetra Brik. (Tetra Pak España, 2008)

En la Figura 1.5 se muestra una fotografía de varios objetos obtenidos utilizando el aglomerado formado a partir de envases Tetra Brik.

Figura 1.5. Productos de planchas de aglomerado (Tetra Pak España, 2008).

1.1.4.3. PROCESO DE HIDROPULPER

Este proceso puede ser realizado en diversos tipos: a baja, media o alta consistencia, el rotor a ser utilizado depende de la metodología usada.

Consiste en hacer decantar en sistemas de tanques que retienen los materiales más densos y que flote la mezcla aluminio – polietileno a través de un flujo ascendente de agua. De esta forma, el material es retirado de los tanques por una rueda de tiraje y alimentados al sistema de disgregación que puede ser continuo o batch.

El sistema batch consiste en ciclos de 3 a 5 minutos donde el material es centrifugado al mismo tiempo en que se inyecta agua. Un flujo continuo de agua durante el proceso hace que la pulpa de papel se desprenda del material y atraviese dejando libre el polietileno y el aluminio. En el sistema continuo el material es inyectado tangencialmente al lavador y el agua es distribuida en diversos puntos del equipo. Un rotor efectúa el proceso de centrifugado y el transporte del material hacia una carcaza perforada por donde se drena la pulpa de papel que luego va al proceso de desagüe y se utiliza para fabricar papel.

Una combinación polietileno- aluminio sale del sistema, con una humedad aproximada de 50-60%. Esta mezcla polietileno-aluminio puede ser reciclada usando tres tecnologías distintas: (Neves, 2003).

1. Extrusión compósito polietileno – aluminio
2. Termo prensado o Termo formado
3. Plasma Térmico

En la Figura 1.6 se muestra una fotografía de los productos obtenidos luego del proceso de hidropulper.

Figura 1. 6. Productos obtenidos luego del proceso de hidropulper (Neves, 2003).

1.1.4.3.1. EXTRUSIÓN DEL COMPÓSITO POLIETILENO-ALUMINIO

El residuo proveniente del proceso de disgregación (hidropulper) formado por polietileno con aluminio es extruido para formar un compuesto paletizado. Este material es utilizado como materia prima para industrias de transformación de plásticos pudiendo ser usado en procesos de inyección o moldeado.

Dependiendo de la aplicación a la que se destina, el material puede ser usado puro o mezclado con otros plásticos como polietileno de alta densidad o polipropileno.

En este proceso todo material fibroso es extraído para que se pueda trabajar en extrusoras convencionales, ya que los contaminantes metálicos aunque en pequeñas cantidades pueden causar daños a los equipos de proceso además de generar imperfecciones a los productos finales.

El proceso de paletizado del polietileno – aluminio consiste de dos etapas:

1. Secado por centrifugado
2. Extrusión, siendo esta etapa dividida en aglutinamiento y extrusión propiamente dicha.

El proceso de extrusión de polietileno ocurre entre 180 y 220ºC, las principales propiedades del producto obtenido se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del polietileno obtenido luego del proceso de extrusión (Neves, 2003).

PROPIEDADES	VALOR	UNIDADES
Temperatura inicial de degradación térmica	245	ºC
Temperatura inicial de degradación termooxidativa	229	ºC
Temperatura de fusión	109	ºC
Temperatura de cristalización	92	ºC
Fracción cristalina	53	%
Tensión de ruptura	10,97	Mpa
Deformación a la ruptura	38,86	%
Módulo elástico	177,6	Mpa
Resistencia al Impacto Izod	305	Mpa
Conductividad eléctrica	$1{,}11 \times 10^{-8}$	S/cm
Índice de fluidez	3,87	g/10 min
Masa específica	0,90	g/cm^3
Calor de fusión	154,7	J/g
Calor de cristalización	154,9	J/g

Una vez paletizado el material puede ser usado para producción de diversos productos como por ejemplo: basureros, colectores, materiales de escritorio, y otros (Neves, 2003).

1.1.4.3.2. PROCESO DE TERMO PRENSADO O TERMO FORMADO

El proceso de termo prensado consiste en triturar el compuesto aluminio – polietileno y alimentar en una prensa con una temperatura de 180ºC para la confección de placas. Este proceso requiere una preselección del material para retirarle los contaminantes pesados como metales al pasar por el hidropulper y son eliminados como rechazo. La mayoría de las empresas que trabajan con termo prensado en Brasil son pequeñas y producen entre 60 y 300 Ton secas al mes de material procesado y efectúan esta operación de preselección manualmente antes de la operación de trituración.

Inicialmente se hace un secado con aire del material que posteriormente es alimentado al triturador con unas cribas de ¾ a 2 pulgadas. El material es alimentado a una prensa y luego de 15 a 20 minutos es retirado y enfriado.

La operación de enfriamiento puede ser realizada en un molde en forma de tejas, obteniendo de esta forma tejas recicladas. Se han comparado las resistencias y el comportamiento térmico de las tejas recicladas a partir de envases Tetra Pak con unas similares de fibrocemento y muestra que las telas recicladas de fibrocemento presentan valores para resistencia de flexión del orden de $4x10^3$ N/m, mientras que las tejas recicladas de polietileno – aluminio presentan valores del orden de $7,63x10^6$ N/m. La absorción de agua de las tejas recicladas presenta valores de 6,5% mientras que las de fibrocemento presentan valores de 37%. Debido a la presencia de aluminio, ocurre en efecto la reflexión de los rayos infrarrojos lo que resulta en un mejor comportamiento térmico. También, las tejas pueden ser revestidas con aluminio u otros materiales que además de dejar un aspecto metalizado, también contribuyen a un mejor comportamiento térmico.

Otros productos fabricados a partir de placas de polietileno-aluminio son muebles, paneles divisorios y partes de asientos de escritorio (Neves, 2003).

En la Figura 1.7 se muestran unas fotografías de los productos obtenidos en el proceso de termo prensado.

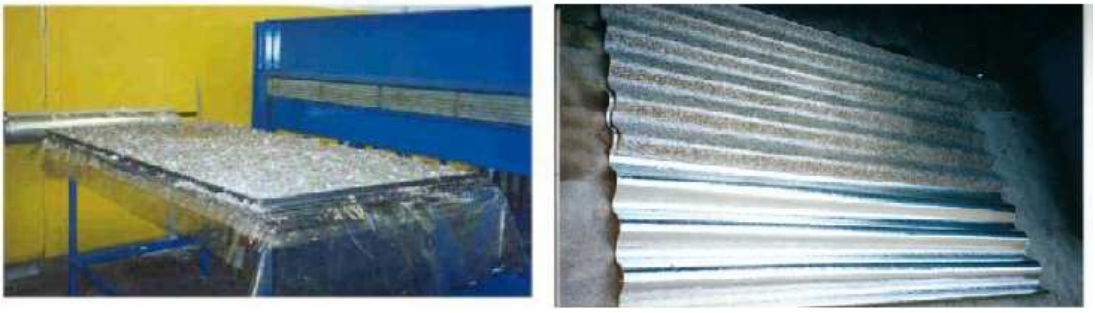

Figura 1. 7. Productos obtenidos en el proceso de termo prensado (Neves, 2003).

1.1.4.3.3. PLASMA TÉRMICO

La tecnología más reciente es la separación de aluminio metálico en un reactor de plasma térmico, generando dos productos de alto valor agregado: aluminio metálico con alta pureza y parafina.

Este proceso consiste en un reactor con una antorcha de plasma accionada eléctricamente que ioniza la atmósfera del interior del reactor pudiendo llegar a 15000ºC. Se alimenta el polietileno-aluminio al reactor, manteniendo la temperatura del proceso entre 650 a 700ºC, ocurre la fusión del aluminio que es retirado líquido y alimentado a una lingotera, mientras que el polietileno sufre una rotura de los enlaces carbono-carbono y carbono-hidrógeno generando la degradación del polímero y formando una mezcla de hidrocarburos gaseosos que pasan por el proceso de condensación dando origen a la parafina.
Los hornos de plasma térmico son usados industrialmente por el hecho de ser posible de alcanzar altas temperaturas, altas densidades energéticas del plasma y el uso de diferentes tipos de gases dependiendo de las necesidades.

Los plasmas térmicos pueden ser generados por 3 maneras:

a) Usando láser.
b) Usando descargas de alta frecuencia y
c) Usando arcos voltaicos, siendo este último el único que tiene importancia desde el punto de vista industrial.

La atmósfera de plasma es creada por el proceso de colisión entre los electrones principalmente de arco voltaico y las moléculas de otras partículas del gas usado en el proceso. Los electrones son acelerados por un campo eléctrico (establecido entre dos electrones) adquiriendo energía cinética que será parcialmente transferida a las partículas de gas aumentando su temperatura.

En sistemas convencionales de fusión es necesario el uso de sal (NaCl, KCl) para evitar la oxidación excesiva del aluminio por el oxígeno. La cantidad de sal adicionada puede alcanzar el 15% del material a ser procesado, lo cual conlleva que luego del proceso esta sal debe ser descartada, representando también un problema desde el punto de vista ambiental.

En el sistema de plasma térmico, no existe riesgo de oxidación ya que el proceso no ocurre por combustión, más si por ionización del medio, lo que permite trabajar con gas inerte en el proceso evitando el uso de oxígeno y consecuentemente se evita la oxidación y pérdida de calidad del aluminio.

Otro punto positivo de este proceso es la altísima tasa de transferencia térmica de la antorcha de plasma debido al alto gradiente de temperatura entre la antorcha de la flama y la atmósfera interna del reactor.

La pureza del aluminio obtenido en planta piloto fue de 98,5%. La parafina obtenida puede ser usada como materia prima en la industria química (cosméticos, lubricantes o combustible debido a su alto poder calorífico).

En la Figura 1.8 se muestra una fotografía de una planta de plasma piloto en Brasil.

Figura 1. 8. Planta de Plasma Piloto en Brasil. (Neves, 2003).

Estudios preliminares están siendo realizados para verificar al viabilidad técnica de usar esta parafina para la producción de eteno que es la materia prima para la fabricación de polietileno.

La cantidad de aluminio que puede ser obtenida por el proceso de plasma térmico es función de la cantidad disponible de material a la entrada, o sea, cuanto menos agresiva sea la separación del papel del filme de aluminio, mejores serán los resultados del proceso de recuperación de aluminio. Los resultados obtenidos en la planta piloto están entre 15 y 20% de aluminio. La cantidad de fibra que entra al reactor también interfiere en el proceso, siendo necesario que se tenga una planta de extracción de fibras antes del reactor de plasma para eliminar los residuos (Neves, 2003).

En la Figura 1.9 se muestra una fotografía de los lingotes de aluminio obtenidos en el proceso de plasma térmico.

Figura 1.9. Lingotes de aluminio obtenidos en el proceso de plasma térmico.

(Neves, 2003).

1.2. EMPAQUES TIPO “BLISTERS”

1.2.1. GENERALIDADES DE LOS EMPAQUES TIPO “BLISTERS”

Los “blisters” son envases combinados, comúnmente de plástico y una matriz de cartón o de aluminio. Son utilizados principalmente para empacar mercancía pequeña.

Existen tres tipos de blister:

- el blister propiamente dicho,
- el skin pack, y
- la ampolla o bubble

1.2.1.1. BLISTER

Es un tipo de embalaje blister que no necesita adhesivo, es de tipo plegable y se obtiene mediante un proceso de plegado en caliente.
Las tabletas como las aspirinas se envasan en un blister que es una base termo conformada, con muchas cavidades de película PVC rígido. Como cobertura se usa una hoja o foil de aluminio que se desgarra para dar acceso al producto (Conferencia envases, 2008).

1.2.1.2. SKIN PACK

Tiene un principio similar al Blister, con la diferencia básica de que la película no se forma con un molde, sino con el producto mismo, por lo que forma una segunda piel del producto (Conferencia envases, 2008).

1.2.1.3. BUBBLE O AMPOLLA

Se fabrica sin molde, hinchando con aire una pieza de película caliente dándole diferentes alturas según la presión de aire (Conferencia envases, 2008).

.

1.2.2. MATERIAS PRIMAS DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Los empaques tipo “Blister” tienen como materias primas para su elaboración rollos de PVC estandarizados con un ancho de 460 mm, y rollos de foil de aluminio. Estas materias primas son llevadas a una máquina selladora de Blister, donde se coloca el blister en la matriz de sellado y se incorpora el producto. Luego se coloca la plancha que constituirá el fondo del envase y con presión y calor el blister es sellado y cortado (Conferencia Envases, 2008).

1.2.2.1. POLICLORURO DE VINILO (PVC)

La obtención y fabricación de cloruro de vinilo monómero por vía petroquímica se realiza por cracking térmico del dicloroetano. Las materias primas utilizadas en su fabricación son:

- Cloro, suministrado por tubería, desde una unidad electrolítica.
- Etileno, suministrado desde una refinería.
- Oxígeno, suministrado por tubería desde una planta de licuación de aire.

La fabricación del monómero del cloruro de vinilo monómero, consta de tres unidades fundamentales:

1) Unidad de Cloración del etileno, donde se mezcla el cloro y el etileno, produciéndose una reacción espontánea y exotérmica, y obteniéndose el 1,2 – dicloroetano.

2) Unidad de Pirólisis del dicloroetano, en la que se produce el craking de la molécula, formándose una molécula de cloruro de vinilo y otra de cloruro de hidrógeno.

3) Unidad de Oxicloración, en la que el cloruro de hidrógeno formado en la pirólisis, se hace reaccionar con etileno y oxígeno, obteniéndose de nuevo 1,2 - dicloroetano para el proceso.

La reacción de polimerización del cloruro de vinilo se desarrolla mediante la unión de millares de unidades monoméricas en una cadena.

El PVC se obtiene por polimerización en suspensión, donde el medio reaccionante de la polimerización contiene agua, monómero, un iniciador y un agente dispersante.

La reacción de polimerización se desarrolla en cada gota de cloruro de vinilo, que se transforma en un grano de PVC. Finalmente la obtención de una suspensión de granos de PVC en agua, se separa el agua por centrifugación, y se seca el PVC en lechos fluidificados y posteriormente se envía a los silos o se paletiza para su posterior expedición.

En la Figura 1.10, se indica el esquema de obtención del PVC en Solvay Martorell (Solvay Martorell, 2008).

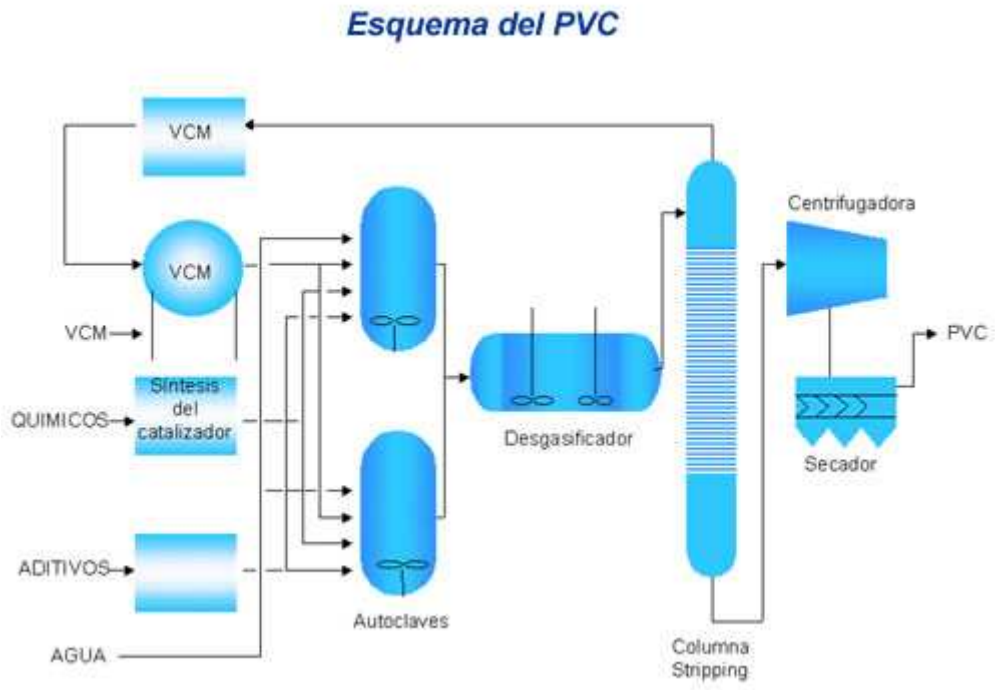

Figura 1.10. Esquema de obtención del PVC en Solvay Martorell

(Solvay Martorell, 2008)

Para el procesado del PVC es necesario fabricar compuestos con aditivos especiales, que permiten obtener productos de variadas propiedades para un gran número de aplicaciones. De acuerdo a los aditivos usados, se obtienen productos rígidos, semi –rígidos o totalmente flexibles (QuimiNet, 2008).

1.2.1.1.1. PELÍCULAS RÍGIDAS DE PVC

Las películas rígidas pueden ser diseñadas para aplicaciones específicas de acuerdo a las necesidades de resistencia química, propiedades de barrera, alta temperatura de deformación o requerimientos FDA para empaque de productos alimenticios o farmacéuticos.

Las películas rígidas de PVC pueden utilizarse para empaque blister pack para diversas industrias como la farmacéutica en tabletas y cápsulas o la alimenticia en diversas formas. Así mismo en industrias como la de discos compactos,

productos de ferretería, cosméticos y otros que requieren un empaque rígido por seguridad o presentación.

Otros productos de esta línea pueden ser usados en empaques para torres de enfriamiento, calcomanías, cajas para flores, empaque de camisas, exhibidores, y otros (QuimiNet, 2006).

1.2.1.1.2. PELÍCULAS SEMIRÍGIDAS DE PVC

En este tipo de películas se tienen diferentes productos como la película semirígida cristal, la semirígida opaca lisa o con diferentes grabados, acabados charol, película para skin pack, material para laminado con tela y algunas otras como cinta eléctrica.

Estos productos son manufacturados mediante un proceso de sellado térmico y requieren de una excelente apariencia, control de espesor, lay flan y muy bajo encogimiento para cumplir con las necesidades del consumidor (QuimiNet, 2006).

1.2.1.1.3. PELÍCULAS FLEXIBLES DE PVC

En este tipo de películas se agrupan la película cristal flexible opaca, grabada y lisa para aplicaciones muy diversas como bolsas selladas o cosidas, cubiertas, recubrimientos, forros, materiales para confección de prendas infantiles, cintas diélectricas, cintas autosellantes, películas para impermebilización y película de uso médico entre otras.

La formulación del PVC hace que su posibilidad de uso sea muy extensa, ya que puede estar en contacto con alimentos o productos farmacéuticos, puede ser resistente a la intemperie y a diversos agentes químicos.

La amplia gama de aplicaciones que ofrece el PVC para su aplicación es ilimitada ya que es uno de los polímeros más versátiles. Las características de la película fabricada a partir de este termoplástico son muy variadas en cuanto a su rigidez o flexibilidad y transparencia, puede imprimirse, grabarse, formarse o sellarse (QuimiNet, 2006).

1.2.3. ALTERNATIVAS DE PROCESO DE EMPAQUES TIPO "BLISTERS"

Los empaques tipo blister, debido a su composición, presentan inconvenientes en su tratamiento de reciclaje especialmente por el PVC presente, ya que este no es fácilmente reciclado en métodos convencionales como la incineración.

Se ha encontrado que productos de PVC pueden ser tratados mediante varios procesos:

- Recuperación de PVC de materiales compuestos por disolución y precipitación.
- Combustión en dos etapas de un residuo de PVC con recuperación de HCl

1.2.3.1. RECUPERACIÓN DE PVC DE MATERIALES COMPUESTOS POR DISOLUCIÓN Y PRECIPITACIÓN.

Este es un proceso desarrollado por la empresa Solvay SA´s R&D de Bruselas. La empresa lo denomina el proceso Vinyloop.

Este proceso sirve para tratar compuestos con PVC, que en el pasado eran difíciles de tratar por la dificultad de separar el plástico de otros materiales. El proceso Vinyloop permite esta separación mediante un sistema de disolución y precipitación. Este permite mantener las características originales del PVC en cuanto a preservantes, estabilizantes, plastificantes y colorantes añadidos al plástico. Además este proceso permite un re-uso directo del PVC reciclado.

El proceso Vinyloop incluye básicamente 6 etapas principales (Vinyloop[R], 2007):

1.2.3.1.1. PRE-TRATAMIENTO

En esta etapa el residuo es recolectado y llevado a la planta. Una vez en la planta, el material el limpiado y sometido a una reducción de tamaño y a una homogenización.

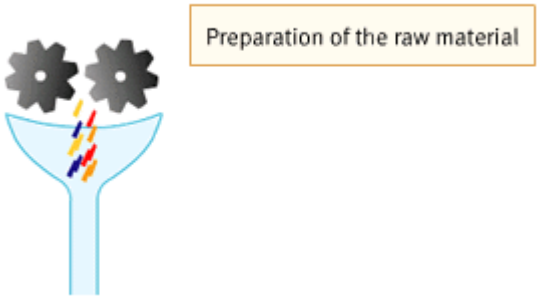

Figura 1.11. Etapa de pre-tratamiento del proceso Vinyloop

1.2.3.1.2. DISOLUCIÓN

Luego del pre-tratamiento, el material es llevado a una cámara de disolución, conde el solvente, metil etil cetona disuelve el PVC y sus aditivos. El material insoluble del residuo flota en la solución y puede ser removido en las etapas posteriores.

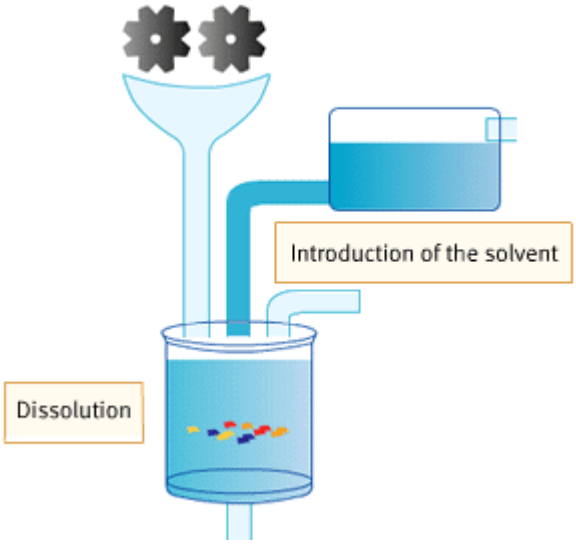

Figura 1.12. Etapa de disolución del proceso Vinyloop.

1.2.3.1.3. SEPARACIÓN DEL MATERIAL INSOLUBLE

Esta etapa ocurre en un nuevo tanque. Hay varias maneras de filtrar los sólidos de la solución, como centrifugación, decantación o con un ciclón, el método usado dependerá de la característica del material insoluble.

Luego de la separación, el material separado el lavado con agua caliente para eliminar todas las trazas de PVC disuelto que pudieran existir. Luego este material es descartado.

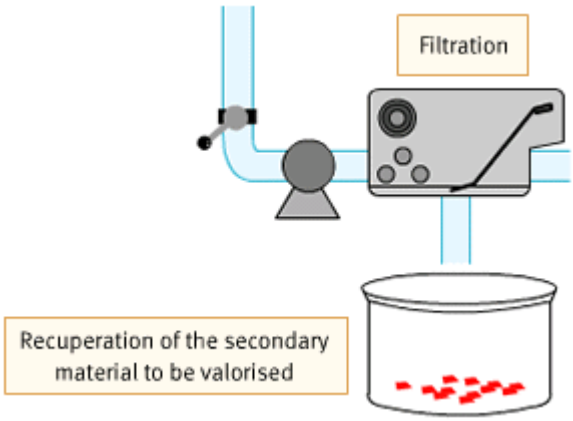

Figura 1.13. Etapa de separación del material insoluble del proceso Vinyloop.

1.2.3.1.4. PRECIPITACIÓN

En esta etapa del proceso es posible añadir ciertos aditivos en el PVC disuelto para darle características especiales según sea el interés, por ejemplo, se puede añadir un plastificante para generar un producto más flexible y menos quebradizo. Se inyecta vapor en la solución, para evaporar el solvente, dejando una suspensión acuosa de PVC y aditivos.

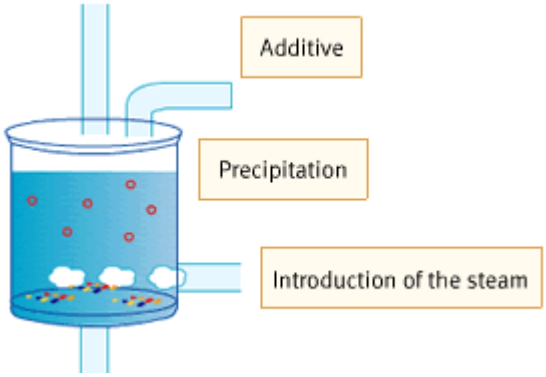

Figura 1.14. Etapa de precipitación del proceso Vinyloop.

1.2.3.1.5. RECUPERACIÓN DEL SOLVENTE

El solvente evaporado se condensa en su cámara original, listo para disolver otro lote de material con PVC. Este ciclo cerrado tiene una retención del 99.9%.

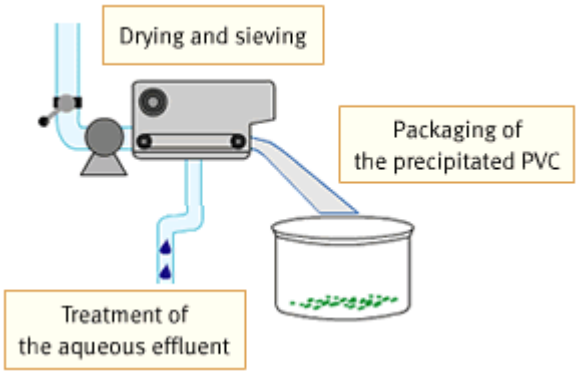

Figura 1.15. Etapa de recuperación del solvente del proceso Vinyloop.

1.2.3.1.6. SECADO

La suspensión acuosa del PVC es secada y el agua es filtrada para remover impurezas. Con el PVC reciclado y seco se forman pellets fáciles de empacar y transportar para que sean usados como materia prima de algún producto plástico.

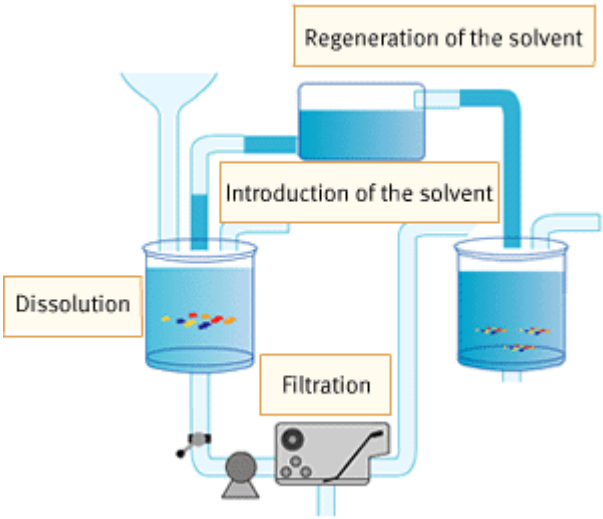

Figura 1.16. Etapa de secado del proceso Vinyloop.

1.2.3.2. COMBUSTIÓN EN DOS ETAPAS DE UN RESIDUO DE PVC CON RECUPERACIÓN DE ÁCIDO CLORHÍDRICO

La base de este proceso es que a temperaturas entre 200 a 400ºC el PVC se descompone en ácido clorhídrico (HCl) y un residuo carbonoso. Este puede ser luego combustionado como cualquier residuo sólido libre de cloro. Los productos del proceso son HCl recuperado y electricidad.

Este proceso combina la combustión de residuos que contengan PVC con una recuperación de energía con la recuperación de HCl. Este proceso difiere de otros procesos de gasificación debido a la baja temperatura en el reactor de pirolisis. Esto tiene la ventaja de que no se trabaja con gases de HCl calientes.

Como primer objetivo se busca la producción de electricidad del residuo, muy aparte de la recuperación de HCl.

El proceso en dos etapas consta de las siguientes reacciones básicas:

A baja temperatura: *PVC+energía E1* $\longrightarrow$ *HCl+hidrocarburo como residuo*
A alta temperatura: *hidrocarburo + aire* $\longrightarrow$ *energía E2* + CO_2 + H_2O

El proceso está basado en dos reactores de lecho fluidizado con un recuperador de calor. Un esquema del proceso simplificado se presenta en la Figura 1.17.

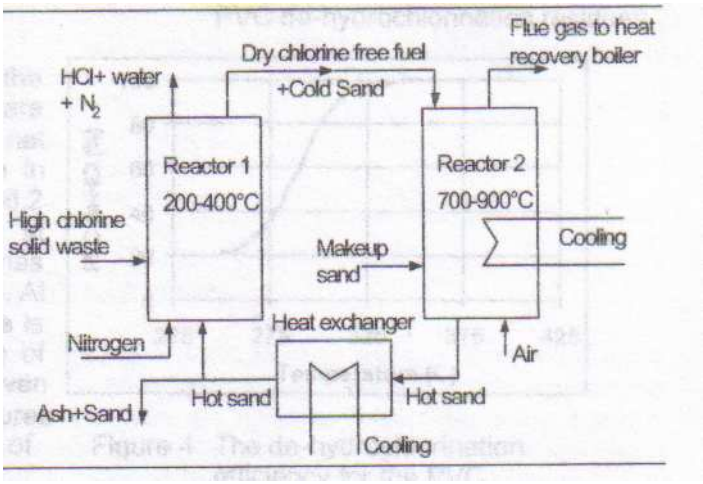

Figura 1. 17. Esquema del proceso combustión en dos etapas de un residuo de pvc con recuperación de ácido clorhídrico (Zevenhoven, Sabed; 2000).

La deshidroclorinación del combustible se da en una cama de arena que es fluidizada con nitrógeno a temperaturas entre 200 y 400ºC en el primer reactor. La razón por la que se usa una atmósfera libre de oxígeno es que esta bloquea la formación de dioxinas y furanos (PCDDs/PCDFs). El cloro mezclado con la humedad del residuo sólido es evacuado. Una ventaja de este proceso es que no se manejan gases calientes de HCl.

La mezcla sólida de arena y residuo libre de cloro es alimentada a el segundo reactor donde este residuo es quemada a temperaturas entre 700 –900ºC. En

este reactor la arena se calienta de manera de dar calor adicional para la generación de vapor, y finalmente, la producción de electricidad. La arena caliente es retroalimentada al primer reactor luego de pasar por un intercambiador de calor que reduce su temperatura a lo necesario en el primer reactor.

En este proceso se realiza un análisis químico de los residuos de PVC pirolizados en una atmósfera de nitrógeno, a temperaturas de entre 250 – 400ºC, obteniéndose lo siguiente:

- A la temperatura de 250ºC la descomposición de PVC ya ha comenzado, teniendo un máximo a temperaturas cerca de 300ºC.
- A temperaturas de 350ºC la cantidad de Cl en el residuo sólido es menos del 0.1%.
- A temperaturas sobre los 350ºC en el PVC se ha eliminado cerca del 99.5% del Cloro.

En este proceso se aclara que existen diferentes tipos de PVC, lo que traería implicaciones al mismo (Zevenhoven, Sabed; 2000).

1.3. PIROLISIS

1.3.1. PIROLISIS APLICADA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Una alternativa para la conversión de materiales que no son fácilmente reprocesados es la pirólisis. El proceso de pirólisis es la descomposición térmica de macromoléculas en ausencia de oxígeno para la obtención de productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos (Teng et al., 1995; Giavarini, 1985; Roy et al., 1990).

Constituye la técnica más común en la cual los residuos sólidos son degradados en ausencia de oxígeno. En el caso de aplicar este procedimiento de reciclado a materiales plásticos, se obtienen tres tipos de productos: una fracción sólida, una líquida y una gaseosa (Hernández, 2007).

1.3.1.1. FRACCIÓN SÓLIDA

Esta fracción está formada por lo que se conoce como residuo carbonoso. Dicho residuo constituido por carbón, representa la pérdida total de hidrógenos del material original pirolizado. Es por tanto el producto de degradación máxima. Es posible encontrar en esta fracción parte del material original a pirolizar que, debido a ciertas condiciones experimentales como puede ser una baja temperatura no es totalmente degradado y permanece como material fundido que luego se solidificará.

1.3.1.2. FRACCIÓN LÍQUIDA

Los productos más pesados del proceso de pirolisis condensan formando lo que se conoce como la fracción líquida. Esta fracción está formada por hidrocarburos de cadena más larga que los que se encuentran en la fase gaseosa y puede ser nuevamente craqueada para generar productos

gaseosos. Estos productos gaseosos pueden ser degradados para producir compuestos importantes para la industria química, como por ejemplo etileno de la “nafta”.

Además estos compuestos formados en la fracción líquida tienen también un uso como carburante, ya que contienen compuestos que pueden ser comparables con los presentes en las gasolinas, y así tener su uso como combustible.

1.3.1.3. FRACCIÓN GASEOSA

Los gases obtenidos en la degradación de materiales plásticos están formados por hidrocarburos de cadena corta que en ocasiones constituyen los monómeros del plástico original.

Los hidrocarburos gaseosos tienen un elevado valor calorífico, mayor o igual a 40 MJ/kg, lo que indica la energía que estos pueden entregar al propio proceso de pirolisis.
La proporción en la que se obtienen las tres fracciones: sólida, líquida o gaseosa depende de una serie de variables como la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula del sólido a degradar, y otros (Hernández, 2007).

1.3.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA PIROLISIS APLICADA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Las principales ventajas del proceso de pirolisis son la obtención de materias primas útiles para la fabricación de productos químicos y la generación de energía. Comparándola con la incineración, la pirolisis puede reducir el problema de contaminación atmosférica al no incorporar oxigeno en el medio de reacción.

En el caso de aplicar un proceso de pirolisis para eliminar los plásticos de los residuos sólidos urbanos, deben de tenerse en cuenta una serie de aspectos relacionados con la eficacia del proceso.

Por una parte, la degradación térmica de macromoléculas es un proceso endotérmico y por tanto requiere cantidades considerables de energía. El inconveniente principal cuando se desea aplicar este tipo de degradación a los materiales plásticos está en el hecho de que estos presentan una baja conductividad térmica, lo que eleva aún más la energía requerida para la pirolisis. Se necesita, por tanto, temperaturas muy elevadas para que la degradación térmica de los residuos plásticos tenga lugar de forma completa en el proceso de pirolisis.

En el caso de la degradación térmica del policloruro de vinilo (PVC) o de otros polímeros halogenados, es necesario controlar la emisión de cloruro de hidrógeno y la emisión de dioxinas.

Las dioxinas son compuestos orgánicos que se generan en la superficie de las cenizas que contienen residuo carbonoso y son arrastradas por el gas, en presencia de cloruro de hidrógeno, oxígeno o agua en intervalos de temperaturas de entre 300 a 400℃. Por tanto, para evitar la formación de estos productos nocivos resulta conveniente trabajar a temperaturas mayores de 1000℃, con tiempos de residencia superiores a 2 segundos y una buena agitación. (Hernández, 2007).

1.4. FUSIÓN DEL ALUMINIO

1.4.1. METALURGIA DEL ALUMINIO

El aluminio se recupera de la bauxita, que es convertida en alúmina mediante el proceso Bayer para luego una separación del aluminio por electrólisis de una sal fundida.

La bauxita es una mezcla de aluminas hidratadas con colores que varían en la gama de los rojos dependiendo del contenido de óxido de hierro. Entre las bauxitas más comunes, tenemos la boehmita (AlO(OH)), diaspore (AlO(OH)) y la gibsita ($Al(OH)_3$). La bauxita además contiene silicio en forma de silicatos, un bajo porcentaje de óxido de titanio y óxido de hierro en forma de goethita (FeO(OH)).

En el proceso Bayer, la bauxita se disuelve en sosa cáustica en una autoclave a 200℃ aproximadamente, de acuerdo a la siguiente reacción:

$$Al_2O_3 + {}_2\,NaOH = {}_2\,NaAlO_2 + H_2O \qquad [1.1]$$

El contenido de silicio se mantiene bajo el 8% para prevenir la formación de un silicato de aluminio soluble, que puede causar una pérdida de eficiencia con respecto al sodio y aluminio. El residuo de lixiviado (barro rojo) consiste esencialmente en óxidos de hierro y titanio. Luego la solución es filtrada e hidrolizada precipitando el hidróxido según la fórmula:

$$NaAlO_2 + {}_2\,H_2O = Al(OH)_3 + NaOH \qquad [1.2.]$$

La adición de semillas de hidróxido ayuda a una mejor precipitación. La solución es filtrada y concentrada por evaporación, la sosa regenerada retorna al proceso de disolución. El hidróxido de aluminio obtenido es convertido en alumina mediante calcinación a 1200 – 1300℃ en un horno rotatorio, según la reacción siguiente:

$$_{2}\ Al(OH)_3 = Al_2O_3 + {}_{3}\ H_2O \qquad [1.3]$$

La reducción de alúmina en aluminio se realiza mediante el proceso Hall – Héroult. La alúmina se disuelve en criolita fundida (Na_3AlF_6) y el aluminio se recupera por electrólisis en el baño fundido. El contenido de alúmina se restringe entre 6 y 8% para evitar la formación de una mezcla pegajosa, y cerca de un 7% de fluoruro de aluminio se añade para disminuir el punto de fusión y prevenir un exceso de disolución de aluminio en el baño. La electrodeposición se lleva a cabo a 960℃ en un cátodo de grafito.

La reacción general es:

$$_{2}\ Al_2O_3 + {}_{3}\ C = {}_{4}\ Al + {}_{3}\ CO_2 \qquad [1.4]$$

El oxigeno liberado por la reacción de la alúmina reacciona con el ánodo de grafito generando CO_2. Cerca del 99.9% del aluminio puro formado se mantiene en estado fundido en el cátodo y se retira regularmente de la celda. El consumo de energía es del orden de 13000 a 13500 kWh por tonelada de aluminio (Feneau, 2002).

1.4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA FUSIÓN DEL ALUMINIO

Debido a la facilidad con que el aluminio se alea a otros metales y a que sus aleaciones pueden moldearse en frío y en caliente, soldarse, extruirse, forjarse o laminarse, se emplean aleaciones de las composiciones más diversas que se pueden someter a tratamientos térmicos para obtener propiedades especiales.

El aluminio y sus aleaciones se funden en hornos con crisol de grafito o de reverbero añadiéndose fundentes y desoxidantes especiales, cuya misión es eliminar todas las impurezas efectuando un lavado y desgasificado o formar una capa protectora en la superficie del metal fundido protegiéndolo contra la

oxidación, volatilización de algunos de sus componentes y de la absorción de gases.

Los fundentes de desescoriado, producen una capa de escorias fácilmente fusibles que arrastran consigo los óxidos metálicos y demás impurezas, separando efectivamente estos elementos perjudiciales del metal fundido (Universidad Tecnológica de Pereira, 2000).

Las sales fundentes más utilizadas son cloruro de potasio (KCl) o cloruro de sodio (NaCl). Estas sales se evaporan y resultan elementos muy contaminantes y nocivos para los operarios y para la corrosión de los equipos (Pagliarussi, 2001).

Durante la fusión del aluminio y sus aleaciones, estas tienen tendencia a absorber hidrógeno y monóxido de carbono procedentes de la combustión del fuel-oil o del carbón utilizado en el calentamiento del horno resultando piezas porosas. Por esta razón es conveniente mantener alejado el metal fundido de los gases de la combustión prefiriéndose el uso de hornos eléctricos, en los que queda eliminado totalmente el riego de de absorción de hidrógeno, también se aconseja el uso de hornos alimentados con gas u hornos de crisol donde la llama no entra en contacto con el metal.

La desgasificación del aluminio fundido se realiza por una cloruración enérgica dentro de la masa fundida. En los grandes hornos de fundición se utiliza el sistema de cloruración introduciendo cloro a presión a través de unas toberas de forma parecida al proceso de oxidación en los convertidores. Este proceso de cloruración se complementa con un tratamiento a base de nitrógeno para eliminar los residuos del cloro.

En pequeñas instalaciones la desgasificación se realiza mediante la introducción de cloro en la masa fundida por medio de un tubo de grafito o más corrientemente por medio de pastillas de exacloretano, con lo cual se obtienen muy buenos resultados.

Siempre debe operarse manteniendo la superficie libre del aluminio fundido cubierta por una capa de fundentes protectores para evitar la oxidación, siendo

el exacto control de temperatura un factor de gran importancia, especialmente en la fusión de aleaciones con metales que se oxidan fácilmente y los sobrecalentamientos pueden producir pérdidas considerables de metal con la consiguiente variación en la composición final y propiedades de las piezas obtenidas.

El aluminio y sus aleaciones presentan con frecuencia inclusiones metálicas que pueden alterar sus propiedades y resultar muy perjudiciales para la fundición. Estas impurezas metálicas como el calcio y el sodio, son a veces benéficas como sucede con el sodio en el afino de las aleaciones de aluminio y silicio o por el contrario, perjudiciales como ocurre cuando existe sodio en las aleaciones que contienen magnesio. Las aleaciones del aluminio que contienen magnesio, deben llevar en la preparación de los moldes, una arena de revestimiento especial que contengan de 2% a 3% de ácido bórico o 2% de bifloruro amónico, ya que son muy propensas a reaccionar con el molde. El magnesio puede oxidarse muy fácilmente durante la fusión, por lo cual es necesario usar fundentes que no sólo protejan el baño, si no que limpien la aleación de óxidos.

Otras impurezas no metálicas como el óxido en aleaciones, reducen la fluidez del metal y producen discontinuidad en la estructura de la aleación debilitando las propiedades mecánicas de las piezas.

Los hornos de fundición de aluminio donde el metal está en contacto con la llama del quemador si bien presenta grandes ventajas como su gran rapidez de fusión y gran producción horaria por kilogramo de combustible, resultan muy poco adecuados para la obtención de piezas sin porosidades y precisan una acción desgasificante enérgica y continua (Universidad Tecnológica de Pereira, 2000).

Si se trabaja en una condición demasiado oxidante, se provocarán ineficiencias en la combustión, y la temperatura de la llama bajará por el efecto de absorción del exceso de nitrógeno y del oxígeno sin quemar. Esta condición también conducirá a mayores pérdidas en la fusión, y a la formación de depósitos de corindón en las paredes del horno.

La energía necesaria para llevar el aluminio a la temperatura de vertido es la suma de tres cantidades:

- Energía necesaria para elevar la temperatura del metal, desde la ambiente (que suele ser el 55% del total).
- El calor de fusión de la aleación o la energía necesaria para convertirla de sólido en líquido (30% del total).
- Energía que se requiere para sobrecalentar el metal hasta la temperatura de vertido (15% del total).

Si la operación de fusión se lleva a cabo en un horno aparte, y la aleación se transfiere a un depósito en una línea de colado, se debe agregar una cantidad adicional de energía para compensar las pérdidas de temperaturas debidas a la transferencia.

El mayor problema al fundir el aluminio es el consumo de energía en cualquier horno de fusión, el cual se debe al calentamiento de la aleación fundida. La energía perdida con los gases de escape y la radiación de la superficie del metal, el casco del horno y las paredes refractarias, así como la debida a la operación, constituyen la mayor parte de las ineficiencias que contribuyen al aumento del costo de fusión.

Así mismo cualquier ahorro directo hecho al mejorar el proceso se debe multiplicar por el factor de eficiencia del horno que se use. Así, si el horno trabaja con 25% de eficiencia, las ventajas de una mejora del proceso se deben multiplicar por un factor de 4, para evaluar su impacto sobre el consumo del combustible (Groteke et *al*, 2000).

1.4.3. PERDIDAS DE ALUMINIO DURANTE LA FUSIÓN

Las pérdidas normales asociadas a la fusión de aleaciones de aluminio se relacionan en forma directa con la masa y el área superficial de la carga y la limpieza general del material. Los materiales metálicos delgados tienen una pérdida desproporcionada de fundido, aun si se exponen a temperaturas

moderadas, durante cualquier cantidad de tiempo, antes de la fusión. Además, la presencia de películas de humedad o material orgánico darán como resultado la conversión directa del metal valioso en óxidos y carburos de aluminio.

Las aleaciones de aluminio son susceptibles a la oxidación a todas las temperaturas, pero las pérdidas pueden ser exageradas si el metal se calienta a más de las temperaturas mínimas necesarias para el proceso. Por ejemplo, si se supone que una temperatura base de 663 ℃ repres enta una pérdida normal por oxidación, al aumentar las temperaturas de reposo a 760 ℃ las pérdidas aumentarán 20%, y el aumento será logarítmico y rápido, arriba de esa temperatura.

La espuma metálica superficial formada durante la carga o las transferencias turbulentas de la aleación fundida suele contener un alto porcentaje de aleación buena de aluminio (90%). La mezcla de aire arrastrado, óxido y aluminio es muy sensible a una mayor velocidad de oxidación continua que un volumen normal de aluminio, y si estás ingresan a ser fundidas se pueden convertir en una ceniza blanca de óxido de aluminio, en un proceso llamado "aluminotermia" o "termitización", que es la reacción exotérmica de quemado de aluminio para formar el óxido.

Esta capa de espuma y óxido que se puede formar se convierte en un aislador perjudicial cuando está sobre la superficie de aluminio fundido, debido a que disminuye la eficiencia de calentamiento, bajando la velocidad de fusión. Por esta razón es indispensable eliminar esta capa de espuma de una manera frecuente durante la fusión para así dejar expuesta una superficie limpia, y optimizar la recuperación del aluminio (Groteke et *al*, 2000).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo recuperar el aluminio presente en los envases “Tetra Pak” y en los envases tipo “Blister”, ambos considerados como desperdicio post-consumo de la industria alimenticia y farmacéutica respectivamente.

Este trabajo es una continuación y profundización del proyecto denominado “Recuperación de aluminio de los envases Tetrapack mediante un proceso de pirolisis, fusión y lixiviación” (ENDARA, Diciembre 2004).

Debido a que se tiene dos materias primas diferentes; “Tetra Pak” y “Blister”, la metodología experimental ha sido separada en dos partes, la primera que indica el proceso a seguir para la recuperación de aluminio de los envases Tetra Pak (Figura 2.1), y la segunda para el proceso de recuperación de aluminio de los empaques tipo “Blister” (Figura 2.4)

2.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA RECUPERACIÓN DE ALUMINIO DE LOS ENVASES TETRA PAK.

En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de flujo de la metodología experimental utilizada para la recuperación de aluminio de los envases Tetra Pak.

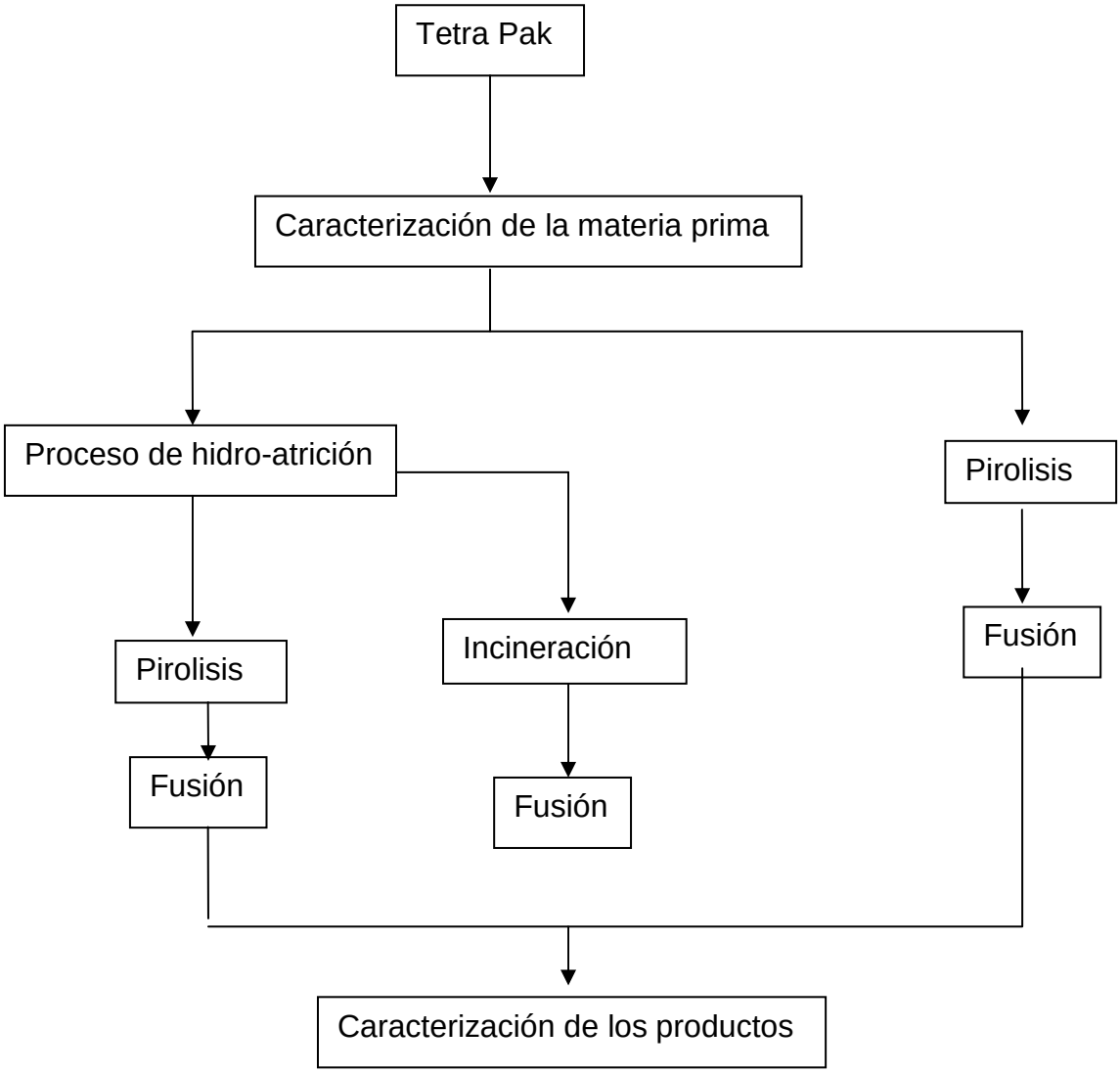

Figura 2. 1. Metodología experimental del proceso a seguir para la recuperación de aluminio de los envases Tetra Pak.

La materia prima, así como los productos obtenidos de los ensayos de pirolisis y fusión son caracterizados mediante análisis físicos (humedad, cenizas, volátiles, carbón fijo), químicos por absorción atómica empleando el equipo Perkin Elmer Aanalyst 300 y mineralógicos por Difracción de Rayos X con el equipo Braker – axs D8 Advance con ayuda del programa Diffrac plus para cualificación y cuantificación.

2.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA TIPO TETRA PAK

La materia prima utilizada constituye envases considerados como desperdicio de la industria alimenticia, que sirven como empaques de leche, vino, jugos, cuyo nombre comercial es “Tetra Pak”.

Como primer paso, se realiza una caracterización física, química y mineralógica de las materias primas para luego realizar pruebas de fusión y recuperación del aluminio presente en estas.

En la caracterización física de los envases Tetra Pak, se analizan el contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbón fijo. Estos análisis se realizan en base de las normas ASTM D3173-87, D3175-89 y D3174-89.

El procedimiento experimental seguido para determinar estas propiedades, se explica en el Anexo I.

Para la caracterización química de los envases Tetra Pak, se realiza disgregación ácida de las láminas de aluminio presentes en los envases, y la solución obtenida se analiza por absorción atómica empleando el equipo Perkin Elmer Aanalyst 300.

El proceso empleado para la disgregación ácida, es el siguiente:

- Se disuelven 200 mg de muestra de Tetra Pak en ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico hasta total disolución de la muestra.

- La solución obtenida, se afora a un matraz de 100 mililitros y se lleva a análisis por absorción atómica para obtener la concentración de los elementos metálicos a conocer: aluminio, hierro, estaño, magnesio, sílice, zinc, plomo, níquel, cobre y cromo.

En la caracterización mineralógica de los envases Tetra Pak se determina los compuestos de cristalización definida presentes en la muestra, empleando el

Difractómetro D8 Advance, y el programa Diffrac plus para cualificación y cuantificación.

2.2.2. ENSAYOS DE HIDROATRICIÓN DE LOS ENVASES TETRA PAK.

Los empaques de cartón-plástico-aluminio (Tetra Pak) son sometidos a un proceso de hidroatrición utilizando 15 kilogramos de materia prima, colocados en un reactor con 25 galones de agua, alcanzando un porcentaje de 15% de sólidos. La mezcla es agitada mediante un agitador mecánico que gira a 800 revoluciones por minuto.

Luego de este proceso, que lleva un tiempo de 2-4 horas, se obtiene como productos: plástico, aluminio y pulpa de papel. El plástico y el aluminio que se encuentran todavía adheridos son llevados a un proceso de pirolisis – fusión. El cartón convertido en pulpa de papel, puede ser utilizado como materia prima para la obtención de papel reciclado.

El equipo utilizado para el proceso de hidroatrición se muestra en la Figura 2.2.

Figura 2. 2. Reactor utilizado para el ensayo de hidroatrición de empaques Tetra Pak.

2.2.3. ENSAYOS DE PIRÓLISIS DE LOS ENVASES TETRA PAK.

Los ensayos de pirolisis se realizan con el fin de separar el aluminio del resto de componentes presentes en los envases Tetra Pak, como son plástico y cartón (si este no ha sido tratado anteriormente en el proceso de hidroatrición).

Con este fin, se trabaja en un horno Nichols Herreshoff mono solera con calentamiento a gas licuado de petróleo (GLP), que puede operar en lecho fijo o lecho agitado con una capacidad de 15 litros.

La atmósfera del horno se controla en base del factor λ, que es la relación entre el aire alimentado al quemador y el aire estequiométrico necesario para la combustión completa del GLP. Por consiguiente $\lambda > 1$ implica una operación en atmósfera oxidante, mientras que $0,4 < \lambda < 1$ corresponde a una operación en atmósfera reductora.

En la Figura 2.3 se muestra una fotografía de una visión panorámica del horno empleado en este ensayo.

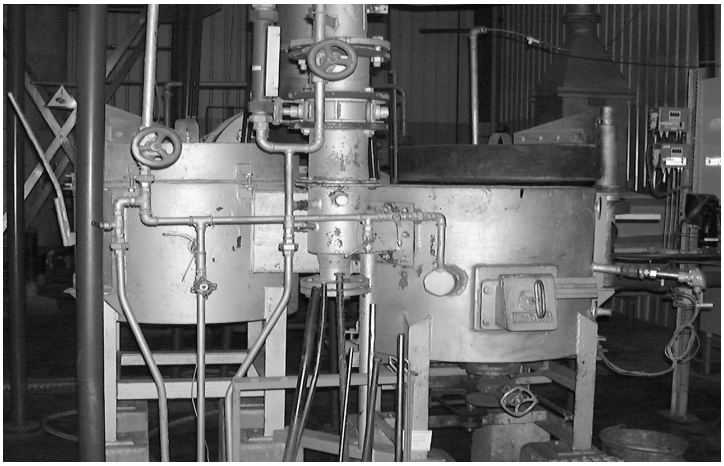

Figura 2. 3. Horno Nichols Herreshoff

Para los ensayos que se realizan en este trabajo se opera el horno en lecho agitado a 4 revoluciones por minuto con un λ de 0,76 en atmósfera reductora a

una temperatura de 560ºC por un tiempo de una hora treinta minutos, estos datos se obtienen tomando como base el trabajo realizado en el proyecto denominado “Recuperación de aluminio de los envases Tetrapack mediante un proceso de pirolisis, fusión y lixiviación” (ENDARA, Diciembre 2004).

Luego de realizado el proceso de pirolisis, se obtiene como productos láminas metálicas y un residuo no metálico.

Las láminas metálicas son caracterizadas para luego realizar varias pruebas de fusión y así obtener aluminio puro.

2.2.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DEL PROCESO DE PIROLISIS DE LOS ENVASES TETRA PAK.

Se realiza una caracterización física de las láminas metálicas obtenidas, determinando humedad, volátiles, cenizas y carbón fijo. Estos análisis se realizan en base de las normas ASTM D3173-87, D3175-89 y D3174-89 (Anexo I).

También se realiza una caracterización química de las láminas metálicas obtenidas del proceso de pirolisis, mediante una disgregación ácida y la solución obtenida se analiza por absorción atómica empleando el equipo Perkin Elmer Aanalyst 300.

El proceso empleado para la disgregación ácida, es como el explicado en la caracterización química de la materia prima (Punto 2.2.1)

2.2.4. ENSAYOS DE FUSIÓN DE ENVASES TETRA PAK.

2.2.4.1. FUSIÓN DE PRODUCTOS DEL PROCESO HIDROATRICIÓN – PIROLISIS DE ENVASES TETRA PAK

Se ensayaron tres pruebas de fusión de las láminas metálicas obtenidas del proceso hidroatrición – pirolisis, variando las características de la carga fundente y su composición, como se indica en la Tabla 2.1.

Todas las pruebas fueron realizadas en una mufla artesanal a temperaturas desde 600ºC hasta 850ºC.

Tabla 2. 1. Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso hidroatrición – pirolisis de envases Tetra Pak.

Ensayo	Peso láminas metálicas (gr)	Fundentes	Peso carga fundente (gr)
1	33,8	Bórax	50,7
		Fluoruro de Calcio	3,4
		Hierro	3,4
2	31,7	Bórax	31,7
		Fluoruro de Calcio	2,2
		Hierro	2,2
3	9,4	Cloruro de sodio	10,0

2.2.4.2. FUSIÓN DE PRODUCTOS DEL PROCESO HIDROATRICIÓN – INCINERACIÓN DE ENVASES TETRA PAK

Se ensayaron varias pruebas de fusión de las láminas metálicas obtenidas del proceso hidroatrición – incineración, variando las características de la carga fundente, su composición y la temperatura de fusión.

Los ensayos se realizaron en una mufla artesanal, a temperaturas de entre 500 y 800ºC, durante un tiempo de dos a tres horas.

Se probaron varias cargas fundentes, los primeros cinco ensayos con Bórax, Fluoruro de calcio e Hierro metálico en polvo en diferentes proporciones. El Ensayo 6 utiliza también esta carga fundente mencionada con la adición de aluminio metálico para ensayar si es posible que este mejore la fundición por arrastre.

En la Tabla 2.2 se indican los ensayos con estas cargas fundentes.

Tabla 2. 2. Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes, Bórax, CaF_2, Fe.

Ensayo	Peso láminas metálicas (gr)	Temperatura (°C)	Fundentes	Peso carga fundente (gr)
4	60,7	T_0 = 600 hasta T = 800	Bórax	86,0
			Fluoruro de Calcio	8,0
			Hierro metálico	8,0
5	42,0	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	42,0
			Fluoruro de Calcio	8,4
			Hierro	8,4
6	47,5	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	47,5
			Fluoruro de Calcio	4,8
			Hierro	9,5
7	22,1	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	22,1
			Fluoruro de Calcio	4,4
			Hierro	2,2
8	30,1	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	30,1
			Fluoruro de Calcio	6,0
			Hierro	9,0
9	31,2	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	31,2
			Fluoruro de Calcio	3,1
			Hierro	3,1
			Aluminio metálico	30,0

Otras pruebas se realizaron utilizando como carga fundente Bórax, Fluoruro de Sodio e Hierro metálico en polvo en varias proporciones, como se indica en la Tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, NaF, Fe.

Ensayo	**Peso láminas metálicas (gr)**	**Temperatura (°C)**	**Fundentes**	**Peso carga fundente (gr)**
10	39,5	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	19,8
			Fluoruro de Sodio	9,9
			Hierro metálico	9,9
11	32,2	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	32,2
			Fluoruro de Sodio	3,2
			Hierro metálico	3,2
12	39,8	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	39,8
			Fluoruro de Sodio	2,8
			Hierro metálico	2,8
13	37,6	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	37,6
			Fluoruro de Sodio	7,5
			Hierro metálico	7,5

Se realizaron tres pruebas, variando las cargas fundentes utilizadas en los anteriores ensayos y adicionando Carbonato de Sodio y Cloruro de Sodio para observar su influencia al combinarse con Bórax, Fluoruro de Sodio, Fluoruro de Calcio e Hierro metálico en polvo.

Las condiciones para estos ensayos se indican en la Tabla 2.4.

Tabla 2. 4. Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, NaF, Fe, CaF_2, Na_2CO_3, NaCl.

Ensayo	Peso láminas metálicas (gr)	Temperatura (°C)	Fundentes	Peso carga fundente (gr)
14	28,1	T constante de 800	Cloruro de sodio	25,3
			Fluoruro de Calcio	7,8
			Carbonato de sodio	8,4
15	51,9	T constante de 850	Cloruro de sodio	44,1
			Fluoruro de Sodio	3,6
			Carbonato de sodio	1,6
			Hierro metálico	2,6
16	34,7	T constante de 850	Cloruro de sodio	31,2
			Fluoruro de Sodio	2,4
			Carbonato de sodio	1,1

Se realizaron dos pruebas más con otras cargas fundentes como se indica en la Tabla 2.5.

Tabla 2. 5. Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, con varias cargas fundentes.

Ensayo	Peso láminas metálicas (gr)	Temperatura (°C)	Fundentes	Peso carga fundente (gr)
17	65,7	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	65,7
			Carbón	6,6
			Fluoruro de calcio	6,6
18	20,3	T_0 = 600 hasta T = 850	Bórax	20,3
			Sílice	40,6

En las Tabla 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5, T0 se refiere a la temperatura inicial de fusión y T es la temperatura a la que se llega en tres horas, subiendo 100ºC las dos primeras horas, y luego 50ºC la última hora.

2.2.4.3. FUSIÓN DE PRODUCTOS DEL PROCESO DE PIROLISIS DE ENVASES TETRA PAK

Se ensayaron varias pruebas de fusión de las láminas metálicas obtenidas del proceso de pirolisis, variando las características de la carga fundente, su composición y la temperatura de fusión.

Los dos primeros ensayos de fusión fueron realizados en el horno Nichols Hereshoff mono solera en atmósfera reductora con un λ = 0,74, a una temperatura de 750℃ por un tiempo de tres horas ut ilizando diferentes cargas fundentes y los siguientes cinco ensayos en una mufla artesanal, a temperaturas de 750ºC, durante un tiempo de dos horas, como se indica en la Tabla 2.6.

Tabla 2. 6. Condiciones de los ensayos de fusión de productos del proceso pirolisis.

Ensayo	Peso láminas metálicas (gr)	Fundentes	Peso carga fundente (gr)
19	21,4	Bórax	21,4
		Fluoruro de Calcio	3,5
		Hierro	2,6
		Aluminio puro	106,1
20	22,3	Aluminio puro	92,2
21	35,0	Bórax	52,5
		Fluoruro de Calcio	3,5
		Hierro	3,5
22	30,6	Bórax	30,6
		Fluoruro de Calcio	2,1
		Hierro	2,1
23	21,4	Cloruro de sodio	10,0
24	20,6	Sin fundentes, crisol tapado	---
25	20,9	Sin fundentes, crisol tapado con un papel	---

2.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA RECUPERACIÓN DE ALUMINIO DE LOS EMPAQUES TIPO BLISTER

En la Figura 2.4 se muestra un diagrama de flujo de la metodología experimental utilizada para la recuperación de aluminio de los empaques tipo blister.

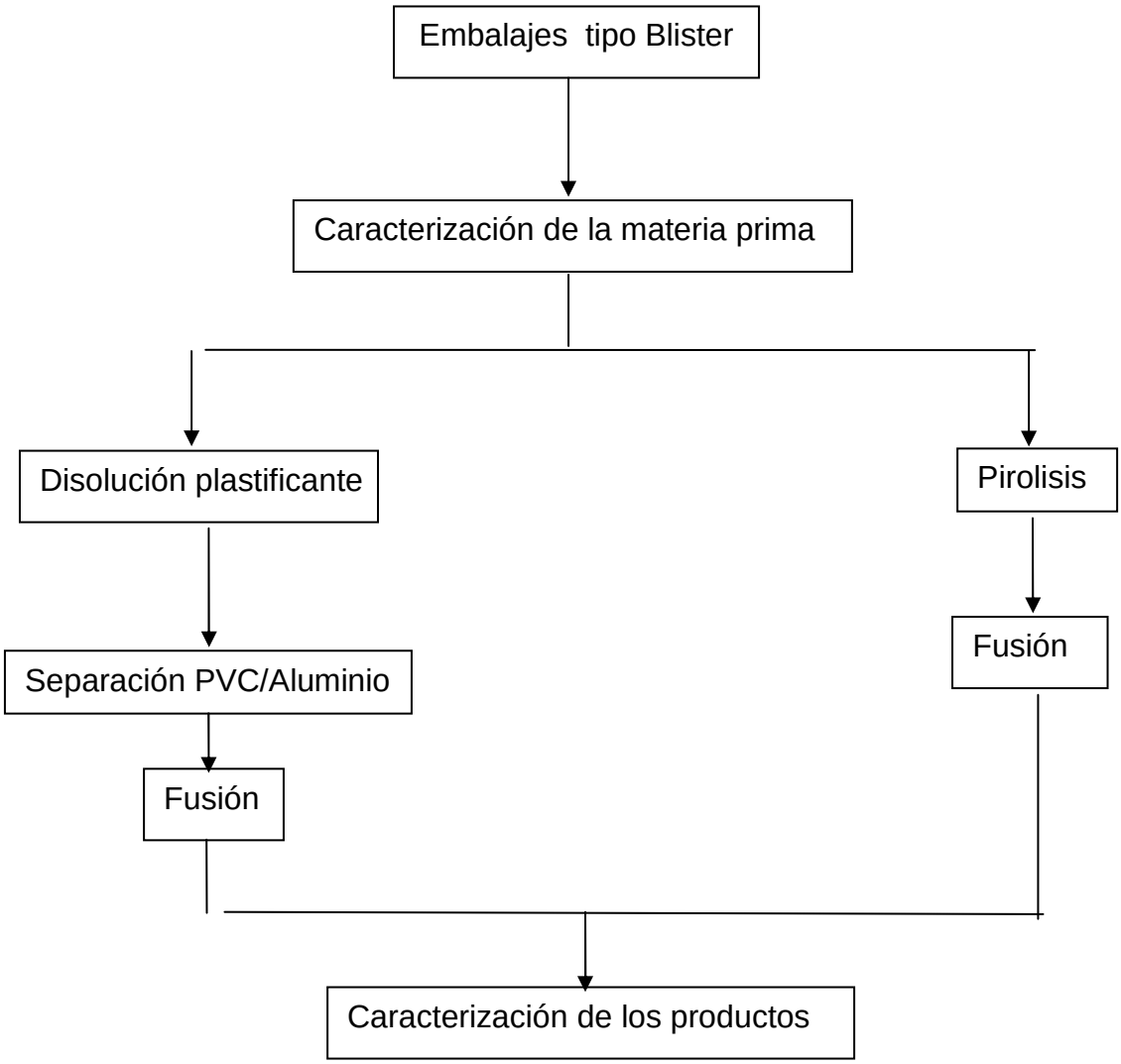

Figura 2. 4. Diagrama de flujo de la metodología experimental utilizada para la recuperación de aluminio de los empaques tipo "Blister".

La materia prima, así como los productos obtenidos de los ensayos de pirolisis y fusión son caracterizados mediante análisis físicos (humedad, cenizas, volátiles y carbón fijo), químicos por Absorción Atómica empleando el equipo Perkin Elmer Aanalyst 300 y mineralógicos por Difracción de Rayos X con el equipo Braker – axs D8 Advance con ayuda del programa Diffrac plus para cualificación y cuantificación.

2.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA TIPO BLISTER

La materia prima utilizada constituye empaques considerados como desperdicio de la industria farmacéutica, que sirven para sellar los medicamentos, cuyo nombre comercial es “Blister”.

Se realiza una caracterización física, química y mineralógica de las materias primas para luego realizar pruebas de fusión y recuperación del aluminio presente en estas.

2.3.1.1. CARACTERIZACION FISICA DE LOS EMPAQUES TIPO BLISTER

Para la caracterización física de los empaques tipo “Blister”, se analiza el contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbón fijo. Estos análisis se realizan en base de las normas ASTM D3173-87, D3175-89 y D3174-89.

El procedimiento experimental seguido para determinar estas propiedades, se explica en el Anexo I.

Para caracterizar el material plástico presente en los envases tipo “Blister” la muestra es laminada en una prensa marca Carver Laboratory Press, modelo 2112, a 150ºC utilizando una presión de 20000 lb/plg2 hasta obtener un film delgado. Se corre el espectro de la muestra mediante un Espectrofotómetro

Infrarrojo por Transformadas de Fourier, marca Perkin Elmer, modelo SPECTRUM 1, por el método de transmitancia.

2.3.1.2. CARACTERIZACION QUIMICA DE LOS EMPAQUES TIPO BLISTER

Para la caracterización química de los empaques tipo “Blister”, se extrae manualmente la lámina metálica presente, se la corta en pedazos de aproximadamente 0,5 centímetros y se lleva a un proceso de disgregación ácida, donde la solución obtenida se analiza por absorción atómica empleando el equipo Perkin Elmer Aanalyst 300, para determinar la concentración de los elementos metálicos a conocer: aluminio, hierro, estaño, magnesio, sílice, zinc, plomo, níquel, cobre y cromo.

El proceso empleado para la disgregación ácida, es como el explicado en el Punto 2.2.1, en la caracterización química de los envases Tetra Pak.

2.3.1.3. CARACTERIZACION MINERALÓGICA DE LOS EMPAQUES TIPO BLISTER

También se realiza una caracterización mineralógica de las cenizas obtenidas de los empaques tipo Blister y de los productos obtenidos luego de fusión, para determinar los compuestos de cristalización definida presentes en la muestra, empleando el Difractómetro D8 Advance, y el programa Diffrac plus para cualificación y cuantificación.

2.3.2. ENSAYOS DE DISOLUCIÓN DEL PLASTIFICANTE DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Tomando como base el proceso planteado por la empresa SOLVAY S.A (Sección 1.2.3.1), para el reciclaje de policloruro de vinilo, se hacen pruebas

para separar el aluminio presente en los empaques tipo “Blister” de la lámina plástica, por medio de una disolución del plastificante que los une, utilizando como solvente Metil Isobutil Cetona (MIBK).

Para esta prueba se cortan los “blister” en pedazos de aproximadamente 2,5 centímetros, y se los coloca en un vaso de precipitación con MIBK a un porcentaje de sólidos del 20%.

Se realizan dos pruebas por un tiempo de 24 horas, una prueba sin agitación y otra prueba utilizando un agitador mecánico a 500 RPM hasta total separación de la lámina metálica del plástico.

2.3.3. ENSAYOS DE PIROLISIS DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Los ensayos de pirolisis se realizan con el fin de separar el aluminio del componente plástico presente en los empaques tipo “Blisters”, si este no ha sido separado anteriormente en el proceso de disolución.

Con este fin, se trabaja en un horno Nichols Herreshoff mono solera con calentamiento a gas licuado de petróleo (GLP) como el empleado para el proceso de pirolisis de los empaques Tetra Pak.

Se realizan seis ensayos de pirolisis de empaques tipo “Blister”, los dos primeros en crisol tapado en una mufla eléctrica, y los cuatro siguientes en el horno Nichols Herreshoff con lecho agitado a 4 revoluciones por minuto con un λ de 0,76 en atmósfera reductora a una temperatura de 560ºC por un tiempo de dos horas, como se indica en la Tabla 2.7.

Tabla 2. 7. Condiciones de los ensayos de pirolisis de empaques tipo “Blister”

Ensayo	Lambda (λ)	Tiempo (hr)	Temperatura (ºC)	Peso inicial (gramos)
1	Crisol tapado	2	600	14,4
2	Crisol tapado	2	600	21,5
3	0,74	2	560	282,1
4	0,76	2	560	259,6
5	0,76	2	560	206,8
6	0,76	2	560	222,9

Luego de realizado el proceso de pirolisis, se obtiene como productos un residuo metálico y uno no metálico, como el que se muestra en la Figura 2.5.

Figura 2. 5. Fotografía de residuo metálico y no metálico obtenido del proceso de pirolisis de los empaques tipo “Blister”.

El producto metálico obtenido se lleva al proceso de fusión para obtener aluminio fundido.

ENSAYOS DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Se ensayaron varias pruebas de fusión del producto obtenido del proceso de pirolisis, variando la cantidad de muestra, la cantidad y composición de la carga fundente y la temperatura de fusión, como se indica en la Tabla 2.8.

Los ensayos se realizaron en una mufla artesanal, a temperaturas de entre 600 y 850ºC, por un tiempo de 2 horas.

Tabla 2. 8. Condiciones de fusión de los empaques tipo “Blister”.

Ensayo	**Peso blister (gr)**	**Temperatura (ºC)**	**Carga Fundente**	**Peso carga fundente(gr)**
1 (muestra pirolizada en mufla)	3,1	To de 600 hasta 850	Bórax	3,1
			Fluoruro de calcio	0,6
			Hierro metálico	0,6
2 (muestra pirolizada en mufla)	14,0	700	Bórax	14,0
			Fluoruro de calcio	3,0
			Hierro metálico	3,0
3 (muestra pirolizada Horno Nichols)	29,4	750	Sin fundentes	---
4 (muestra pirolizada Horno Nichols)	27,9	750	Cloruro de sodio	15
5 (muestra pirolizada Horno Nichols)	27,5	750	Bórax	27,4
			Fluoruro de calcio	5,0
			Hierro metálico	4,3
6 (lámina de aluminio retirada manualmente)	20,7	750	Sin fundentes	---
7 (residuo metálico del proceso de disolución)	5,0	750	Sin fundentes	---
8 (residuo metálico del proceso de disolución)	5,0	750	Bórax	5,0
			Fluoruro de calcio	0,4
			Hierro metálico	0,4
9 (residuo metálico del proceso de disolución)	5,2	750	Cloruro de sodio	2,5

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DE ENVASES TETRA PAK

3.1.1. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE ENVASES TETRA PAK

Los resultados de caracterización física para las determinaciones de humedad, cenizas, volátiles y carbón fijo de acuerdo a la metodología descrita en la sección 2.2.1, se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Humedad, cenizas, volátiles y carbón fijo de los envases Tetra Pak.

Caracterización	Porcentaje (%)
Humedad	4,7
Volátiles	82,1
Cenizas	10,9
Carbón fijo	7,0

El Tetra Pak es un material con un bajo contenido de humedad, cerca del 5%, un 82% de material volátil, conformado por el cartón y el plástico presentes en los envases, un 11% que corresponde a cenizas, las cuales son básicamente el aluminio presente, y un 7% de carbón fijo.

3.1.2. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE ENVASES TETRA PAK

Las cenizas de los envases Tetra Pak, al ser disgregadas para determinar el porcentaje de elementos metálicos, presentan los resultados indicados en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Lectura en análisis por absorción atómica de cenizas de envases Tetra Pak.

Elemento	Contenido (%)	Elemento	Contenido (%)
Al	52,5	Zn	<0,01
Fe	0,5	Pb	0,02
Sn	0,2	Ni	0,05
Mg	0,7	Cu	0,02
Si	0,9	Cr	<0,01

En la caracterización química, las cenizas de los envases Tetra Pak presentan un porcentaje de aluminio del 53%, 0,9% de silicio, 0,7% de magnesio, 0,5% de hierro, 0,2% de estaño, como los metales presentes en mayor cantidad. Elementos como el níquel, plomo, cobre, cromo y zinc presentan valores menores al 0,1%.

3.1.3. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE ENVASES TETRA PAK

El análisis mineralógico de las cenizas de los envases Tetra Pak muestra los resultados indicados en la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Análisis mineralógico de cenizas de envases Tetra Pak.

Material	Fórmula	Contenido (%)
Aluminio	Al	50,0
Corundum	Al_2O_3	35,0
Magnesita	$MgCO_3$	3,0
Portlandita	$Ca(OH)_2$	7,0
Perowskita	$CaTiO_3$	5,0

Se puede observar que las cenizas de los envases Tetra Pak presentan en su composición un 50% de aluminio puro y un 35% de óxido de aluminio. Esto debido principalmente al proceso a alta temperatura al que fueron sometidos

los envases Tetra Pak para la obtención de las cenizas, por lo tanto se dio la oxidación del aluminio a corindón.

Además se tiene un 7% en peso de hidróxido de calcio, un 5% de $CaTiO_3$ proveniente de la pintura de los envases, y un 3% de carbonato de magnesio.

3.2. RESULTADOS ENSAYOS DE HIDROATRICIÓN DE ENVASES TETRA PAK.

Los ensayos de hidroatrición al ser llevados a cabo bajo las condiciones expuestas en la metodología experimental, sección 2.2.2, dieron los resultados esperados.

Es decir, al ser mezclados en un reactor con una agitación de 800 RPM al 15% de sólidos, durante un tiempo de 2-4 horas, los envases Tetra Pak, dan como productos pulpa de papel y un residuo aluminio – plástico (Al – PE), como se muestra en la Figura 3.1.

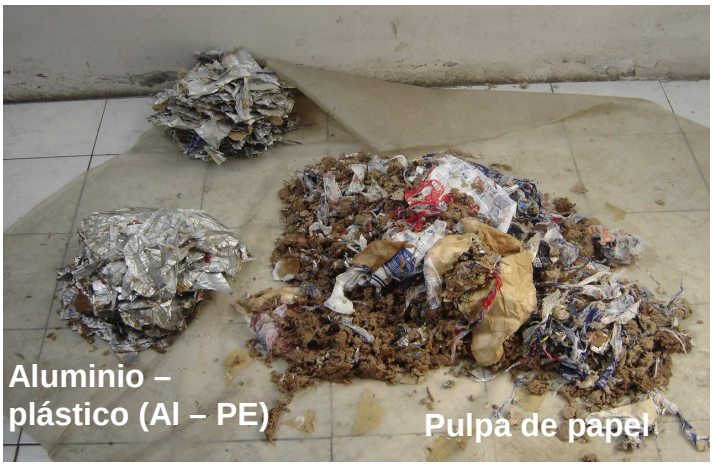

Figura 3. 1. Fotografía de los productos obtenidos del proceso de hidropulper.

3.2.1. RESULTADOS ENSAYOS DE PIROLISIS DE PRODUCTOS OBTENIDOS DE HIDROATRICIÓN DE ENVASES TETRA PAK.

El producto obtenido del proceso de hidroatrición es llevado en su totalidad a pirolisis en el Horno Nichols Mono solera con calentamiento a gas licuado de petróleo, utilizando una atmósfera de λ = 0,74 por un tiempo de 4 horas aproximadamente a una temperatura de 640℃, como se indica en la Tabla 3.4, donde se especifica la cantidad de Tetra Pak hidropulpeado llevado a pirolisis y su porcentaje de recuperación.

Tabla 3. 4. Condiciones de pirolisis de producto obtenido luego del proceso de hidropulpeado de envases Tetra Pak (AL-PE).

Ensayo	λ	T (ºC)	Tiempo (h)	Tetra Pak hidropulpeado (g)	Residuo Al-PE pirolizado (gr)	Recuperación (%)
1	0,74	640	4,5	2746,6	287,5	10,5

Los ensayos de pirolisis indican que al pirolizar el Tetra Pak hidropulpeado, cerca de un 90% del peso total de este se pierde como material volátil y un 10% representa el material metálico que se recupera.

En la Figura 3.2 se indica el producto obtenido del proceso de pirolisis del material luego del ensayo de hidroatrición.

Figura 3. 2. Fotografía del producto obtenido del proceso de pirolisis.

3.2.1.1. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN FISICO-QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE AL - PE PIROLIZADO.

Al analizar el contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del residuo obtenido luego del proceso de pirolisis del AL – PE (residuo de hidroatrición de envases Tetra Pak), se tiene los resultados que se indican en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 5. Caracterización física del producto Al – PE pirolizado.

Caracterización	Porcentaje (%)
Volátiles	2,4
Cenizas	97,6

El producto aluminio – plástico (Al – PE) luego de ser sometido a un proceso de pirolisis, tiene un 98 % de cenizas, lo que representa el contenido de aluminio luego del proceso de hidroatrición – pirolisis.

Sin embargo, existe todavía un contenido de material volátil de un 2%, debido al material plástico presente en el Tetra Pak hidroatricionado, que tampoco fue eliminado en el proceso de pirolisis.

Al realizar el análisis químico por absorción atómica del producto aluminio – plástico (Al – PE) pirolizado, se tienen los resultados presentados en la Tabla 3.6.

Tabla 3. 6. Análisis químico por absorción atómica del producto Al –PE pirolizado.

Elemento	Contenido (%)
Al	95,6
Fe	0,6
Sn	0,03
Mg	0,03
Si	0,19

Como indica el análisis químico por absorción atómica, el producto Al – PE pirolizado tiene 96% de aluminio, lo que demuestra que el residuo metálico se ha separado parcialmente del cartón en el proceso de hidroatrición y luego del plástico y residuos de cartón en el proceso de pirolisis.

Existe, sin embargo, todavía un pequeño porcentaje de plástico y elementos presentes en el envase tales como: hierro, silicio, zinc y magnesio que no han sido removidos en el proceso de hidroatrición - pirolisis.

Este resultado confirma lo ya obtenido en el análisis de volátiles y cenizas, en la Tabla 3.5.

Los resultados del análisis mineralógico por Difracción de Rayos X de una lámina obtenida en el proceso combinado hidroatrición - pirolisis, se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3. 7. Análisis mineralógico del producto obtenido del proceso de pirolisis.

Material	Fórmula	Contenido (%)
Aluminio	Al	51,8
Corundum	Al_2O_3	1,0
Diaspore	Al O (OH)	47,2

El análisis mineralógico muestra que en el producto metálico de envases Tetra Pak luego del proceso de hidroatrición - pirolisis se tiene un 52% de aluminio puro, pero existe una oxidación del aluminio indicado en el 1% de corindón

obtenido y además un 47% de un hidróxido de óxido de aluminio (diaspore), mineral que se forma por alteración del mineral corindón.

3.3. RESULTADOS ENSAYOS DE PIROLISIS DE LOS ENVASES TETRA PAK.

Las pruebas de pirolisis basaron su fundamento en el trabajo previamente realizado denominado “Recuperación de aluminio de los envases Tetrapack mediante un proceso de pirolisis, fusión y lixiviación” (ENDARA, Diciembre 2004), las condiciones de operación y los productos obtenidos, con su respectivo porcentaje de recuperación de láminas metálicas, se indican en la Tabla 3.8.

Tabla 3. 8. Condiciones de operación en el ensayo de pirolisis, y recuperación de láminas metálicas.

Ensayo	λ	T (ºC)	Tiempo (h)	Tetra Pak (g)	Láminas metálicas	Residuo no metálico	Recuperación láminas metálicas (%)
1	0,76	600	1,5	10809	501,5	1717,3	4,6

En la Figura 3.3 se indica una fotografía de la materia prima antes del proceso de pirolisis y los productos obtenidos, luego de pirolizarla en las condiciones antes especificadas.

Figura 3. 3. Fotografía de la materia prima y del producto obtenido del proceso de pirolisis.

Como producto del proceso de pirolisis se obtienen láminas metálicas fácilmente separables del residuo no metálico, como se puede apreciar en la Figura 3.4.

Figura 3. 4. Fotografía del producto obtenido en el proceso de pirolisis.

Se observa que el porcentaje de recuperación de láminas metálicas, las cuales representan el aluminio presente en los envases Tetra Pak, es del 4,6%.

3.3.1. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN FÍSICO, QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LOS PRODUCTOS DE PIROLISIS DE ENVASES TETRA PAK.

Se realiza un análisis físico de las láminas metálicas obtenidas en el proceso de pirolisis, presentando los resultados en la Tabla 3.9.

Tabla 3. 9. Caracterización física de láminas metálicas producto del ensayo de pirolisis. (λ = 0,76)

Caracterización	Porcentaje (%)
Cenizas	100

Los resultados muestran que los envases Tetra Pak pirolizados con una atmósfera reductora, utilizando un λ de 0,76 y a una temperatura de 600ºC por un tiempo de una hora treinta minutos presentan un 100% de cenizas, y no presentan valores para volátiles y carbón fijo.

Las cenizas obtenidas son analizadas por absorción atómica para determinar su composición química. Los resultados muestran que las láminas metálicas obtenidas del proceso de pirolisis tienen un 100% de aluminio.

También se realiza un análisis mineralógico de las cenizas de las láminas obtenidas del proceso de pirolisis, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3. 10. Análisis mineralógico de cenizas del producto obtenido en el proceso de pirolisis.

Material	Fórmula	Contenido (%)
Aluminio	Al	60,0
Corundum	Al_2O_3	40,0

El análisis mineralógico de las cenizas del producto metálico obtenido del proceso de pirolisis muestra un 60% de aluminio y un 40% de óxido de aluminio. Al comparar estos resultados con los obtenidos del análisis mineralógico del producto metálico del proceso hidroatrición – pirólisis (ver Tabla 3.7), se puede observar que existe un porcentaje de aluminio más alto (cerca del 8%) al pirolizar directamente los envases Tetra Pak que cuando estos son sometidos a pirolisis luego del ensayo de hidroatrición.

También se observa que se forma una mayor cantidad de corindón (40%) comparado con el 1% del residuo metálico del proceso hidroatrición – pirolisis.

El aumento de la cantidad de óxido de aluminio se debe a que el análisis mineralógico fue realizado a las cenizas del producto de pirolisis, y para esto,

se le sometió a una temperatura de 900℃, temperatura en la cual el aluminio se oxido.

3.4. RESULTADOS ENSAYOS DE FUSIÓN DE ENVASES TETRA PAK

3.4.1. RESULTADOS DE FUSIÓN DE PRODUCTOS DEL PROCESO HIDROATRICIÓN – PIROLISIS

En cada ensayo de fusión se obtiene una fase metálica y una fase escoria, para cada uno, se indica en la Tabla 3.11 el porcentaje de fase metálica obtenido, respecto al peso de muestra a fundir.

Tabla 3. 11. Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos del proceso hidroatrición – pirolisis.

Ensayo	Peso muestra (gr)	Condiciones de fusión	% Fase metálica
1	33,8	Fundentes: 50,7 gr. Bórax, 3,4 gr. CaF_2, 3,4 gr. Hierro	1,5
2	31,7	Fundentes: 31,7 gr. NaCl, 2,2 gr. CaF_2, 2,2 gr. Na_2CO_3	2,2
3	9,4	Fundentes: 10 gr. NaCl	13,8

Los resultados muestran que la mejor carga fundente utilizada para la recuperación de aluminio puro del producto obtenido del proceso hidroatrición – pirolisis, es Cloruro de Sodio al 100% en peso respecto a la masa a fundir, obteniéndose cerca de un 14% de fase metálica.

En las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se muestran fotografías de la fase metálica obtenida en los tres primeros ensayos del proceso hidroatrición – pirolisis – fusión.

Figura 3. 5. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – pirolisis como indica el Ensayo 1.

Figura 3. 6. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – pirolisis como indica el Ensayo 2.

Figura 3. 7. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – pirolisis como indica el Ensayo 3.

3.4.2. RESULTADOS DE FUSIÓN DE PRODUCTOS DEL PROCESO HIDROATRICIÓN – INCINERACIÓN

En cada ensayo de fusión se obtiene una fase metálica y una fase escoria.

En los primeros cinco ensayos utilizando como carga fundente Bórax, Fluoruro de calcio e Hierro metálico en polvo en diferentes proporciones, y en el Ensayo 6 adicionando aluminio metálico, se obtienen porcentajes de fase metálica respecto al peso de muestra a fundir, que se indican en la Tabla 3.12.

Tabla 3. 12. Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes, Bórax, CaF_2, Fe.

Ensayo	Peso muestra (gr)	Condiciones de fusión	% Fase metálica
4	60,7	Fundentes: 86 gr. Bórax, 8 gr. CaF_2, 8 gr. Hierro	27,2
5	42,0	Fundentes: 42 gr. Bórax, 8,4 gr. CaF_2, 8,4 gr. Hierro	28,6
6	47,5	Fundentes: 47,5 gr. Bórax, 4,8 gr. CaF_2, 9,5 gr Hierro	5,1
7	22,1	Fundentes:22,1 gr. Bórax, 4,4 gr. CaF_2, 2,2 gr. Hierro	46,8
8	30,1	Fundentes: 30,1 gr. Bórax, 6 gr. CaF_2, 9 gr. Hierro	23,6
9	31,2	Fundentes: 31,2 gr. Bórax, 3,1 gr. CaF_2, 3,1 gr. Hierro, 30 gr. Aluminio metálico	28,0

Estos ensayos muestran que se obtiene mayor porcentaje de recuperación (47%) cuando se usa mayor cantidad de Fluoruro de Calcio (20% en peso respecto a la masa a fundir) y menor cantidad de Hierro metálico en polvo (10% en peso respecto a la masa a fundir), además de 100% en peso de Bórax.

Al utilizar 100% en peso de Bórax, 20% en peso de Fluoruro de Calcio y 30% en peso de hierro metálico en polvo se obtiene una recuperación de 23,6% de fase metálica.

La adición de aluminio metálico en la fusión no incrementa la cantidad de aluminio como fase metálica, obteniéndose recuperaciones del 28% utilizando 100% de Bórax, 10% de Fluoruro de Calcio y 10% de Hierro metálico en polvo, como carga fundente en peso respecto a la cantidad de muestra a fundir.
Se tiene un porcentaje de recuperación de fase metálica de 27,2% al utilizar 150% en peso de Bórax, 13% en peso de Fluoruro de Calcio y 13% en peso de Hierro metálico, respecto a la cantidad de masa a fundir.

Se tiene un porcentaje de recuperación de fase metálica de 28,6% al utilizar 100% en peso de Bórax, 20% en peso de Fluoruro de Calcio y 20% en peso de Hierro metálico, respecto a la cantidad de masa a fundir.

Recuperaciones del 27% se obtienen al utilizar como carga fundente un exceso de Bórax (150% en peso respecto a la masa a fundir), y aproximadamente 13% en peso de Fluoruro de Calcio y Hierro metálico en polvo.

El menor porcentaje de recuperación de fase metálica (5,1%) se obtiene cuando se adiciona menor cantidad de Fluoruro de Calcio que de Hierro metálico en polvo, respecto a la cantidad de masa a fundir.

En las Figuras 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 se muestran fotografías de la fase metálica obtenida en los ensayos del proceso hidroatrición – pirolisis, utilizando como carga fundente Bórax, Fluoruro de Calcio, Hierro metálico en polvo y aluminio.

Figura 3. 8. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 4.

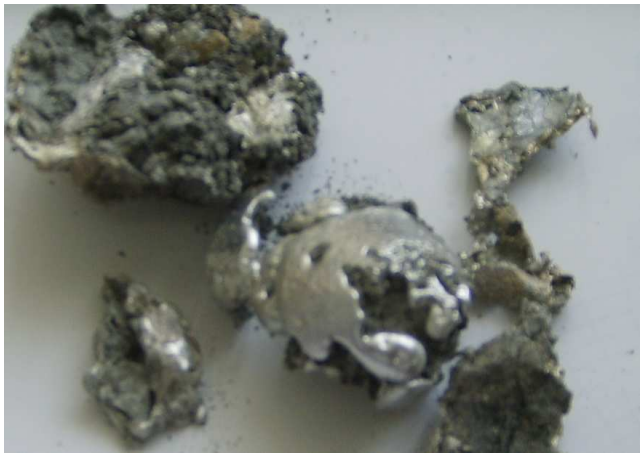

Figura 3. 9. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 5.

Figura 3. 10. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 6.

Figura 3. 11. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 7.

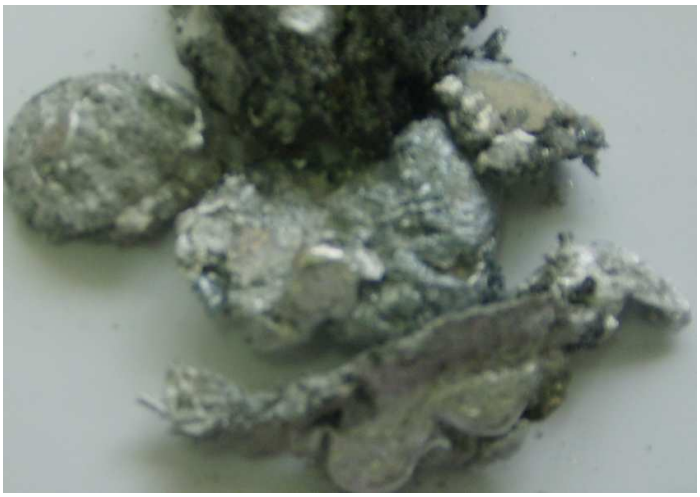

Figura 3. 12. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 8.

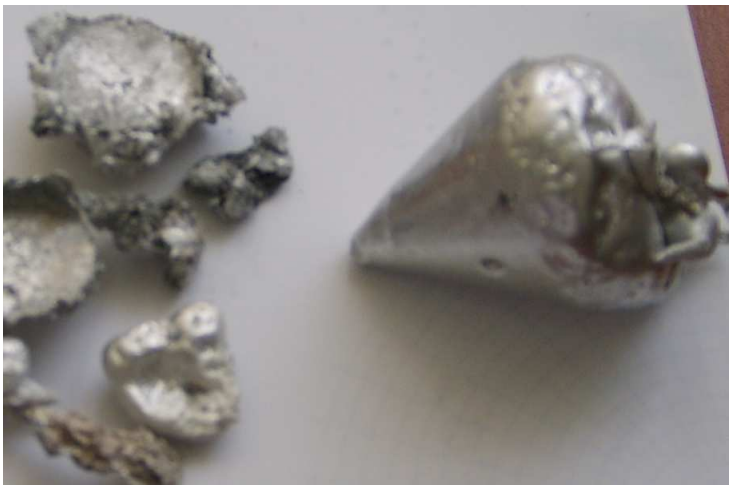

Figura 3. 13. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 9.

Los tres ensayos siguientes, utilizando como carga fundente Bórax, Fluoruro de Sodio e Hierro metálico en polvo en varias proporciones, dieron como porcentaje de fase metálica, lo que se muestra en la Tabla 3.13.

Tabla 3. 13. Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes, Bórax, NaF, Fe.

Ensayo	**Peso muestra (gr)**	**Condiciones de fusión**	**% Fase metálica**
10	39,5	Fundentes: 19,8 gr. Bórax, 9,9 gr. NaF, 9,9 gr. Hierro	11,4
11	32,2	Fundentes: 32,2 gr. Bórax, 3,2 gr. NaF, 3,2 gr. Hierro	53,1
12	39,8	Fundentes: 39,8 gr. Bórax, 2,8 gr. NaF, 2,8 gr. Hierro	23,6
13	37,6	Fundentes: 37,6 gr. Bórax, 7,5 gr. NaF, 7,5 gr. Hierro	53,9

Las fusiones realizadas utilizando como carga fundente 100% Bórax, 10% de Fluoruro de Sodio y 10% de Hierro metálico en polvo como se indica en el Ensayo 11 dieron como resultado porcentajes de recuperación de un 53,1%.

Este porcentaje de recuperación de fase metálica es mayor en un 7% al obtenido cuando se utiliza Fluoruro de Calcio en lugar de Fluoruro de Sodio.

Al utilizar menor cantidad de fundentes (50% en peso de Bórax, 25% en peso de Fluoruro de sodio y 25% en peso de Hierro metálico en polvo), la recuperación alcanzada es del 11%, lo que indica que para obtener una mayor fase metálica es necesario utilizar un porcentaje más alto de carga fundente en relación a la masa a fundir, para obtener mejores resultados.

El mayor porcentaje de recuperación se obtiene al utilizar como carga fundentes 100% en peso respecto a la masa a fundir de Bórax, 20% en peso respecto a la masa a fundir de Fluoruro de Sodio y 20% en peso respecto a la masa a fundir de Hierro metálico en polvo.

En las Figuras 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17 se muestran fotografías de la fase metálica obtenida en los Ensayos 10, 11, 12 y 13 del proceso hidroatrición – pirolisis – fusión.

Figura 3. 14. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 10.

Figura 3. 15. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 11.

Figura 3. 16. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 12.

Figura 3. 17. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 13.

El porcentaje de fase metálica obtenido al variar las cargas fundentes antes utilizadas y adicionando Carbonato de sodio y Cloruro de Sodio, para analizar su influencia, se indica en la Tabla 3.14.

Tabla 3. 14. Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, utilizando como fundentes Bórax, NaF, Fe, CaF_2, Na_2CO_3, NaCl.

Ensayo	**Peso muestra a fundir (gr)**	**Condiciones de fusión**	**% Fase metálica**
14	28,1	Fundentes: 25,3 gr. NaCl, 7,8 gr. CaF_2, 8,4 gr. Na_2CO_3	53,0
15	51,9	Fundentes: 44,1 gr. NaCl, 3,6 gr. NaF, 1,6 gr.Na_2CO_3, 2,6 gr.Hierro	13,5
16	34,7	Fundentes: 31,2 gr. NaCl, 2,4 gr. NaF, 1,1 gr. Na_2CO_3	14,9

En estos ensayos se puede observar que la mezcla Cloruro de Sodio (90% en peso respecto a la masa a fundir), Fluoruro de Calcio (30% en peso respecto a la masa a fundir), y Carbonato de Sodio (30% en peso respecto a la masa a fundir), da como resultado un porcentaje de fase metálica del 53%.

También se aprecia que si en lugar de Fluoruro de Calcio se usa Fluoruro de Sodio (Ensayo 14 y Ensayo 15) el porcentaje de recuperación disminuye en cerca de un 40%.

En las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19, se muestran fotografías de la fase metálica obtenida en los Ensayos 14, 15 y 16 del proceso hidroatrición – pirolisis – fusión.

Figura 3. 18. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 14.

Figura 3. 19. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 15.

Figura 3. 20. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 16.

Los últimos dos ensayos realizados con cargas fundentes diferentes, dieron como resultado de porcentaje de fase metálica obtenida que se indica en la Tabla 3.15.

Tabla 3. 15. Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos del proceso hidroatrición – incineración, con varias cargas fundentes.

Ensayo	Peso muestra a fundir (gr)	Condiciones de fusión	% Fase metálica
17	65,7	Fundentes: 65,7 gr.Bórax, 6,6 gr. Carbón, 6,6 gr. CaF_2	22,5
18	20,3	Fundentes: 20,3 gr. Bórax, 40,6 gr. Sílice	20,0

En estos ensayos se puede observar que se tiene un mayor porcentaje (22,5%) de fase metálica al utilizar como carga fundente 100% Bórax, 10% Carbón y 10% Fluoruro de calcio (porcentajes respecto a la masa metálica a fundir). Siendo este porcentaje menor a los obtenidos en los ensayos anteriores, con otras cargas fundentes.

En las Figuras 3.21 y 3.22 se muestran fotografías de la fase metálica obtenida en los Ensayos 17 y 18 del proceso hidroatrición – pirolisis – fusión.

Figura 3. 21. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 17.

Figura 3. 22. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso hidroatrición – incineración como indica el Ensayo 18.

3.4.3. RESULTADOS DE FUSIÓN DE PRODUCTOS DEL PROCESO DE PIROLISIS.

En cada ensayo de fusión se obtiene una fase metálica y una fase escoria, para cada uno, se indica en la Tabla 3.16 el porcentaje de fase metálica obtenido, respecto al peso de muestra a fundir.

Tabla 3. 16. Porcentaje de fase metálica obtenida en la fusión de productos del proceso de pirolisis.

Ensayo	Peso muestra a fundir (gr)	Condiciones de fusión	% Fase metálica
19	21,4	Fundentes: 21,4 gr. Bórax, 3,5 gr. CaF_2, 2,6 gr. Hierro metálico, 106,1 gr. aluminio metálico	83,3
20	22,3	Fundentes: 92,2 gr. Aluminio metálico	0,5
21	35,0	Fundentes: 52,5 gr Bórax, 3,5 gr. CaF_2, 3,5 gr. Hierro metálico	8,9
22	30,6	Fundentes: 30,6 gr. Bórax, 2,1 gr. CaF_2, 2,1 gr. Hierro metálico	27,8
23	21,4	Fundentes: 10,0 gr. NaCl	33,2
24	20,6	Fundentes: Sin fundentes, crisol tapado.	96,6
25	20,9	Fundentes: Sin fundentes, crisol tapado con un papel.	89,9

Los ensayos de fusión de los productos del proceso de pirolisis muestran que la mayor recuperación de aluminio, cerca del 97%, se tiene al fundirlos sin ninguna carga fundente, con las debidas precauciones de que el oxigeno interfiera lo menos posible en este proceso, lo que se consigue tapando el crisol el momento de fundir.

Así mismo, al realizar la fusión sin la adición de ninguna carga fundente y tapando la muestra en el crisol con un pedazo de papel, se consigue un porcentaje de recuperación de 89,9%. Lo que muestra la efectividad de evitar el ingreso de oxígeno a la muestra, para evitar la oxidación del aluminio a óxido de aluminio.

Los ensayos de fusión realizados en el Horno Nichols como se indica en la sección 2.2.4.3 mostraron mejores resultados cuando se utilizan como fundentes Bòrax, Fluoruro de Calcio e Hierro metálico en polvo, logrando recuperaciones de 83%. Sin embargo, cabe anotar que en estas muestras se

adicionó aluminio puro, y no se logro obtener una fase homogénea entre el aluminio puro y el producto pirolizado de Tetra Pak.

Utilizando una carga fundente de 50% de Cloruro de sodio en peso se obtiene un 33% de fase metálica.

Y utilizando una carga fundente de 100% en peso de Bórax respecto a la masa a fundir, 7% en peso de Fluoruro de Calcio y 7% en peso de Hierro metálico se obtiene una recuperación de fase metálica del 28%. Mientras que aumentando el porcentaje en peso de Bórax a un 150% respecto a la cantidad de masa a fundir la recuperación disminuye en un 20%.

Desde la Figura 3.23 hasta la Figura 3.28 se muestran fotografías tomadas a los productos de fusión de los ensayos realizados en el proceso pirolisis – fusión.

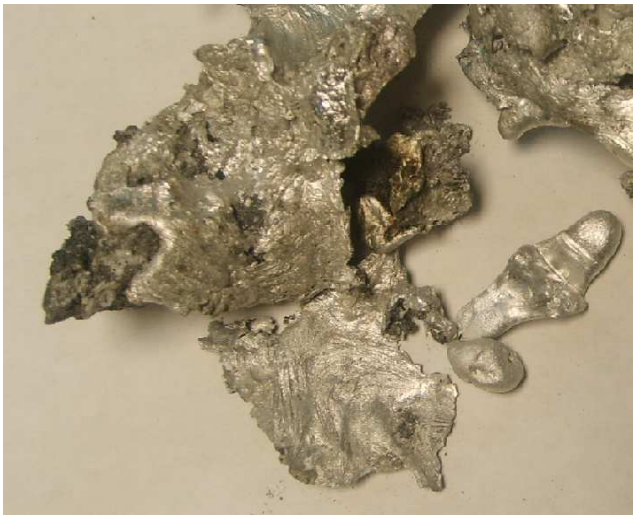

Figura 3. 23. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 19.

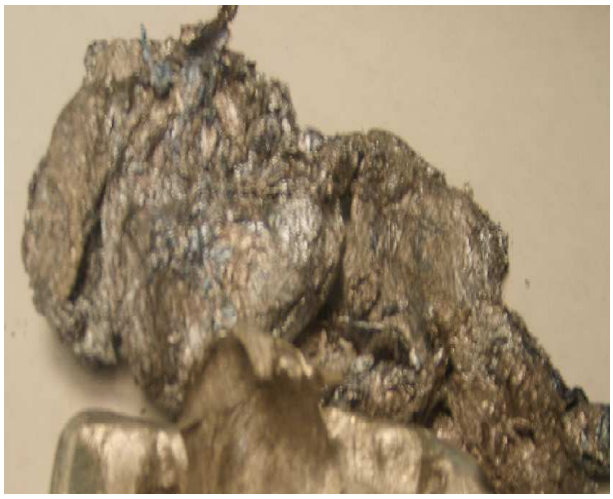

Figura 3. 24. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 20.

Figura 3. 25. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 21.

Figura 3. 26. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 22.

Figura 3. 27. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 23.

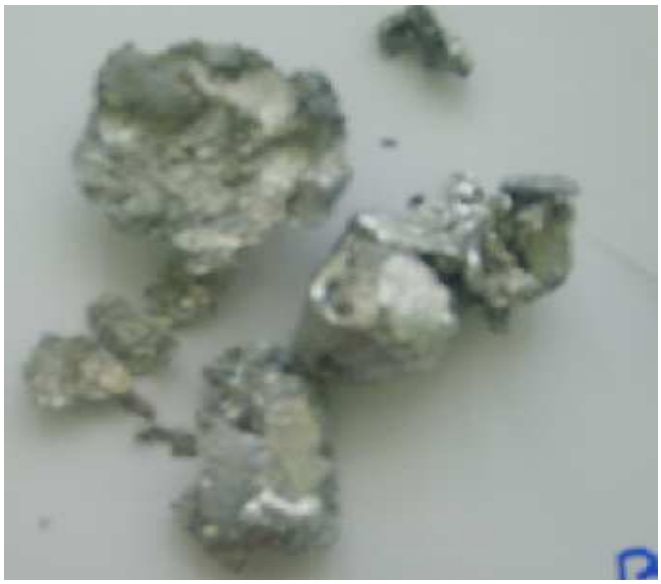

Figura 3. 28. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 24.

Figura 3. 29. Fotografía de fase metálica obtenida al fundir producto del proceso de pirolisis como indica el Ensayo 25.

3.5. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DE EMPAQUES TIPO "BLISTER"

3.5.1. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE EMPAQUES TIPO "BLISTER"

En la Tabla 3.17 se muestran los resultados obtenidos en la caracterización física de los empaques tipo "Blister", se especifica porcentaje de volátiles, cenizas y carbón fijo.

Tabla 3. 17. Caracterización física de empaques tipo "Blister".

Caracterización	Porcentaje (%)
Volátiles	77,67
Cenizas	16,89
Carbón fijo	5,44

Los empaques tipo "Blister" se caracterizan por poseer un 78% de volátiles, los cuales representan básicamente el PVC y los plastificantes presentes en estos, 17% de cenizas que representan el aluminio y la pintura de los empaques, y un 5% de carbón fijo.

Al analizar la muestra plástica de los empaques tipo "Blister" mediante un espectrofotómetro de Infrarrojo, se obtiene un espectro como el que se muestra en la Figura 3.30, el cual se encuentra superpuesto a un espectro estándar de un co-polímero PVC – acetato de polivinilo (Espectro azul).

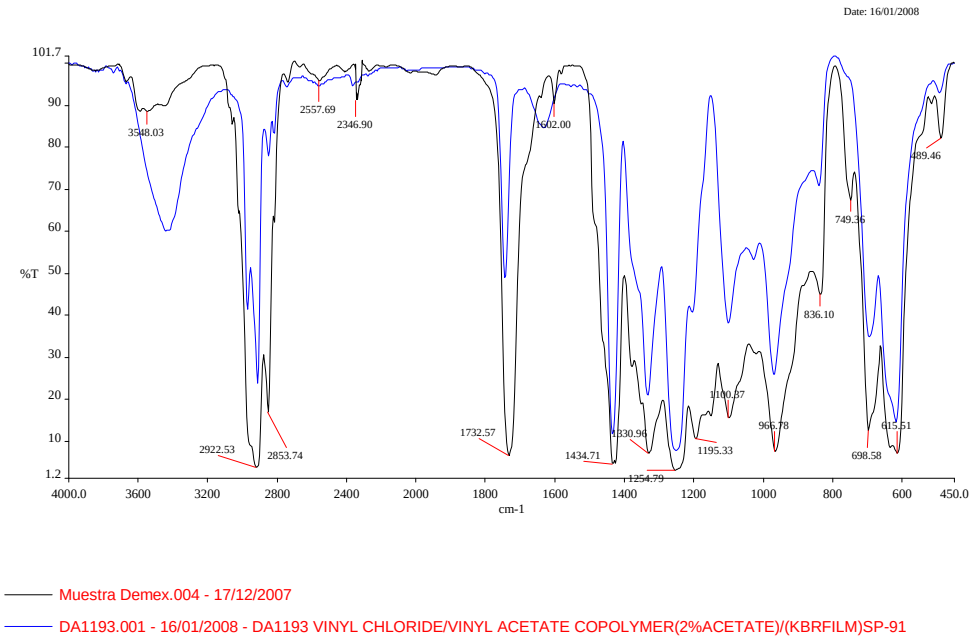

Figura 3. 30. Espectro infrarrojo de muestra plástica de empaques tipo "Blister" superpuesta al espectro estándar de un co-polímero PVC – acetato de vinilo.

Como se puede observar el espectro de la muestra plástica presente en los empaques tipo "Blister" tiene un espectro similar al estándar mostrado coincidiendo los picos más importantes, por lo que se concluye que el material plástico presente en los empaques tipo "Blister" se trata de un co – polimero PVC – acetato de polivinilo.

3.5.2. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE EMPAQUES TIPO "BLISTER"

La Tabla 3.18 muestra el análisis químico por absorción atómica de los empaques tipo "Blisters".

Tabla 3. 18. Análisis por absorción atómica de empaques tipo “Blister”.

Elemento	Porcentaje	Elemento	Porcentaje
Al	77,49	Cu	<0,01
Fe	0,23	Zn	<0,01
Sn	0,02	Cr	<0,01
Mg	0,02		

El análisis químico muestra un porcentaje de aproximadamente 78% de aluminio presente en los empaque tipo “Blister”, 0,23% de hierro y 0,02% de estaño y magnesio, como los metales más representativos.

3.5.3. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE EMPAQUES TIPO “BLISTER”

En la Tabla 3.19 se muestran los compuestos con cristalización definida presentes en las cenizas de los empaques tipo Blister.

Tabla 3. 19. Análisis mineralógico de cenizas de empaques tipo “Blister”.

Compuesto	Fórmula	Contenido (%)
Aluminio	Al	63,0
Corindum	Al_2O_3	36,0
Hematita	Fe_2O_3	1,0

El análisis mineralógico realizado a las cenizas de los empaques tipo Blister muestra que existe un 63% de aluminio metálico, con presencia de 36% de aluminio oxidado (corindón) y un 1% de óxido de hierro.

La oxidación del aluminio se debe al tratamiento térmico al que fueron sometidos los empaques tipo “Blister” al ser convertidos en cenizas.

3.6. RESULTADOS ENSAYOS DE DISOLUCIÓN DEL PLASTIFICANTE DE LOS EMPAQUES TIPO BLISTER

En los ensayos de disolución realizados como se menciona en la sección 2.3.2, se logra separar las láminas metálicas de las láminas plásticas. La separación total se realiza manualmente y se obtiene los productos que se muestran en la Figura 3.31.

Figura 3. 31. Fotografía de los productos obtenidos en el proceso de disolución.

La lixiviación en MIBK no solubiliza el plástico de los empaques, pero si permite separar la lámina metálica del plástico para así poder fundir la lámina metálica sin el problema de tratar el PVC en un proceso térmico, lo que puede dar como emisiones contaminantes dioxinas y furanos.

Se pesan las láminas metálicas obtenidas, teniendo los resultados expresados en la Tabla 3.20.

Tabla 3. 20. Porcentaje láminas metálicas obtenidas en el ensayo de disolución de empaques tipo “Blister”

Ensayo	**Agitación**	**Tiempo (hr)**	**Peso inicial (gr)**	**Peso láminas metálicas (gr)**	**Porcentaje láminas metálicas (%)**
1	Sin agitación	24	42,1	9	21,4
2	Agitación mecánica 500 RPM	24	103,0	30,3	29,4

Los resultados indican que existe de 20 a 30 % en peso de láminas metálicas, presente en los empaques tipo “Blister”, siendo el resto el co – polímero PVC – acetato de polivinilo y las tintas de impresión.

Las láminas plásticas obtenidas en el proceso de disolución en MIBK, son sometidas a un análisis por Espectrofotometría de Infrarrojo, para ser comparadas con el espectro obtenido de la muestra original del material plástico de los empaques tipo Blister.

Este análisis además permite evaluar la posibilidad de reciclado del material plástico luego del proceso de disolución.

Existen dos tipos diferentes de láminas plásticas presentes en los empaques tipo Blister, una color blanco (Muestra 1) y otra color anaranjado (Muestra 2) como se muestra en la Figura 3.32.

Figura 3.32. Fotografía de tipos diferentes de láminas plásticas de empaques tipo "Blister"

Los espectros del análisis por Espectrofotometría de Infrarrojo, obtenidos de las dos muestras plásticas se muestran en la Figura 3.33 y Figura 3.34.

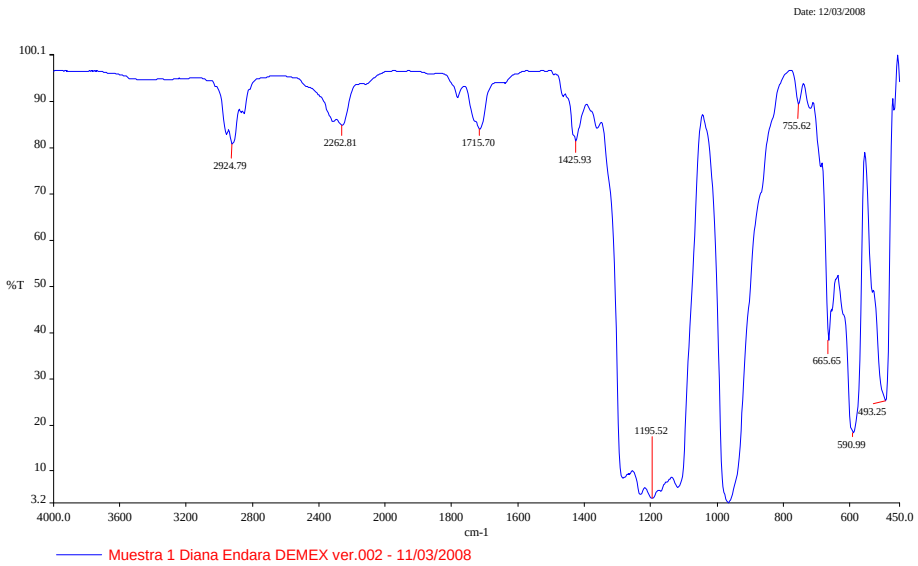

Figura 3. 33. Espectro infrarrojo de la muestra 1 (blanca) luego del proceso de disolución.

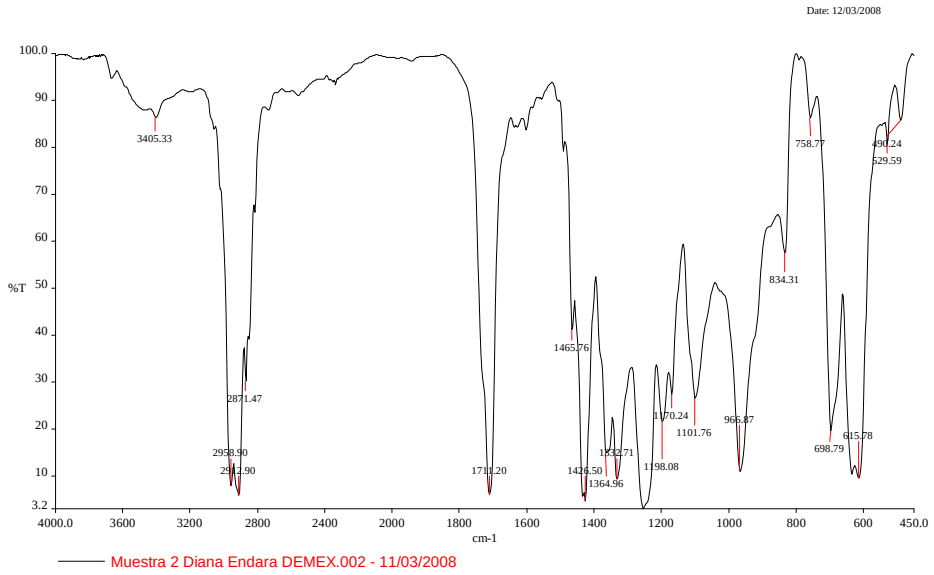

Figura 3.34. Espectro Infrarrojo de la muestra 2 (anaranjada) del proceso de disolución

La muestra plástica M1 de color blanco, luego de ser sometida a un proceso de disolución en MIBK con el objeto de separar el material plástico del metálico de los empaques tipo Blister, ha sufrido una degradación que se puede observar al superponer su espectro con el obtenido de la muestra plástica inicial, como se muestra en la Figura 3.35. Este espectro muestra picos ubicados en posiciones diferentes a los de la muestra plástica inicial.

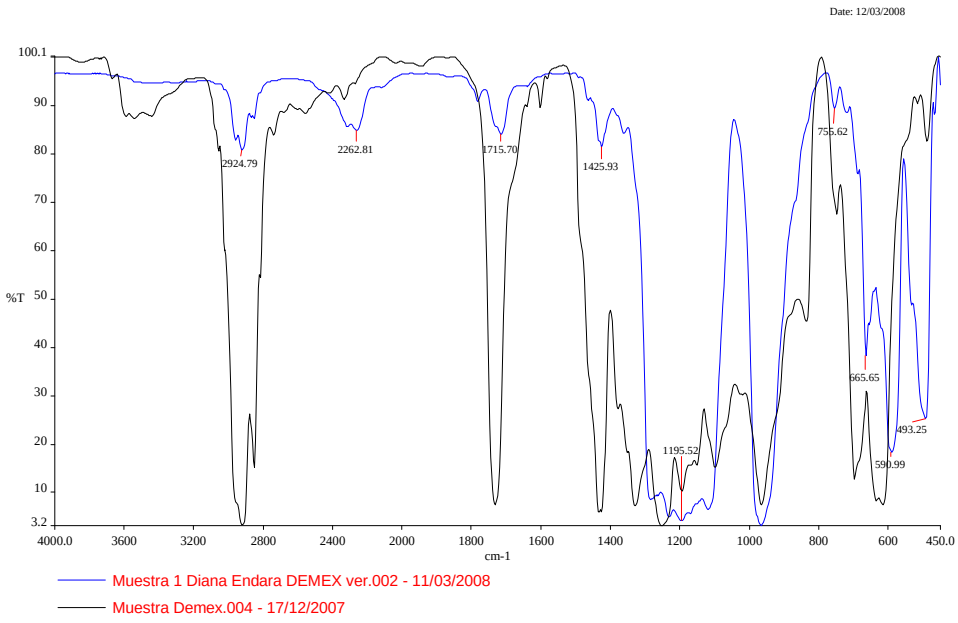

Figura 3. 35. Espectro Infrarrojo de muestra plástica M1 (Blanca) obtenida luego del proceso de disolución (azul) y Espectro Infrarrojo de muestra plástica inicial (negro).

En la Figura 3.36, se observa que la muestra plástica M2 de color anaranjado, luego de ser sometida a un proceso de disolución en MIBK con el objeto de separar el material plástico del metálico de los empaques tipo Blister, no ha sufrido un alto grado de degradación, lo que se observa al superponer su espectro con el estándar del co-polímero PVC – acetato de vinilo.

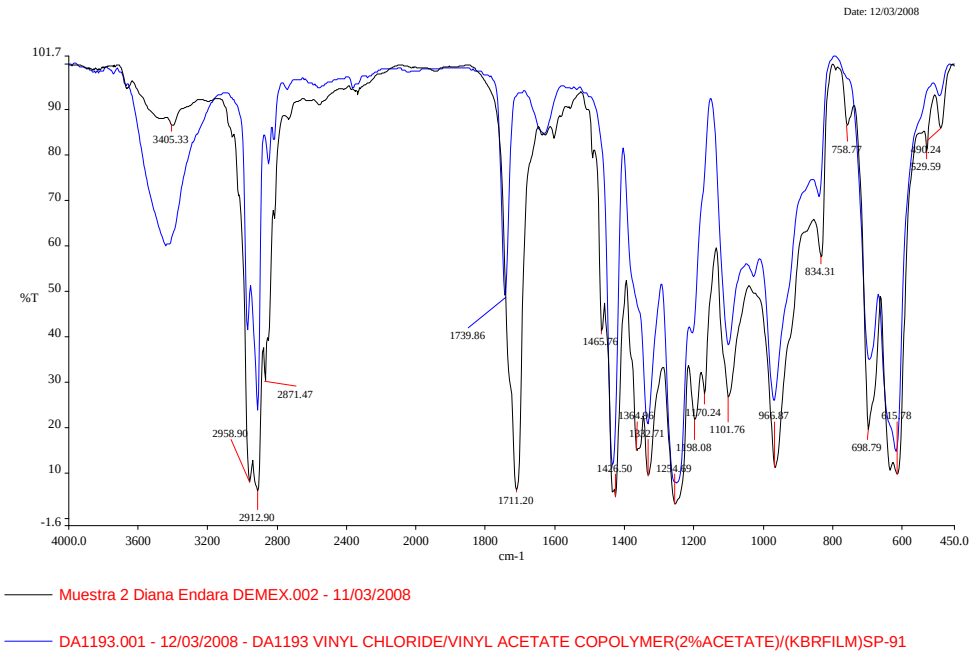

Figura 3. 36. Espectro Infrarrojo de muestra plástica M2 (Anaranjada) obtenida luego del proceso de disolución (negro) y Espectro Infrarrojo co – polímero PVC – acetato de vinilo (azul).

3.7. RESULTADOS ENSAYOS DE PIROLISIS DE EMPAQUES TIPO BLISTER

En los ensayos de pirolisis realizados a los empaques tipo “Blister”, la separación del producto metálico y no metálico resulta dificultosa. En la Tabla 3.21 se presenta en peso del producto luego de haber sido sometido al proceso de pirolisis.

Tabla 3. 21. Resultados ensayos de pirolisis de empaques tipo “Blister”

Ensayo	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Porcentaje Recuperación (%)
1	14,4	3,1	21,5
2	21,5	3,7	17,2
3	282,1	75,7	26,8
4	259,6	72,3	27,9
5	206,8	55,8	26,9
6	222,9	55,4	24,9

Como se puede observar existe entre 17 a 28% de recuperación del producto pirolizado de los empaques tipo “Blister”.

Al realizar un análisis químico por absorción atómica del producto obtenido después del ensayo de pirolisis, se obtiene como resultado que existe un 100% de aluminio.

3.8. RESULTADOS ENSAYOS DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Los resultados del porcentaje de fase metálica obtenida en los 9 ensayos de fusión de empaques tipo Blister se indican en la Tabla 3.22.

Tabla 3. 22. Porcentaje de fase metálica de ensayos de fusión de empaques tipo "Blister"

Ensayo	Condiciones de fusión	% Fase metálica
1	Fundentes: 3,1 gr. Bórax, 0,6 CaF_2, 0,6 Hierro metálico	10,9
2	Fundentes: 14 gr. Bórax, 3 gr. CaF_2, 3 gr. Hierro metálico	28,5
3	Fundentes: Sin fundentes	32,9
4	Fundentes: 15 gr. NaCl	7,9
5	Fundentes: 27 gr. Bórax, 5 gr. CaF_2, 4 gr. Hierro metálico	8,0
6	Fundentes: Sin fundentes	89,9
7	Fundentes: Sin fundentes	66,0
8	Fundentes: 5 gr. Bórax, 0,4 gr. CaF_2, 0,4 gr. Hierro metálico	35,0
9	Fundentes: 2,5 gr. NaCl	40,4

Como se puede apreciar el mayor porcentaje de recuperación, con cerca de un 90%, se obtiene al fundir la lámina de aluminio retirada manualmente de los empaques tipo blister sin la adición de ninguna carga fundente.

Los empaques tipo blister sometidos al proceso de pirolisis, tienen el mayor porcentaje de recuperación al ser fundidos sin ninguna carga fundente, obteniéndose un 32,9% de aluminio metálico.

En el proceso disolución – fusión, se obtiene recuperaciones del 66% sin la adición de carga fundente al producto obtenido al disolver los empaques tipo blister en metil isobutil cetona.

Análisis químicos por espectrofotometría de absorción atómica de los productos obtenidos en los Ensayos 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 de fusión de los empaques tipo Blister, se indican a continuación.

3.8.1. RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO ENSAYO 2 DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Al realizar un análisis químico por absorción atómica de la fase metálica obtenida en el proceso de fusión, para analizar varios elementos metálicos, se tiene los resultados indicados en la Tabla 3.23.

Tabla 3. 23. Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 2.

Elemento	Porcentaje	Elemento	Porcentaje
Al	89,7	Zn	<0,01
Fe	1,7	Cu	<0,01
Sn	0,02	Cr	<0,01

Como se puede observar, el análisis químico muestra la presencia en un 89% de aluminio, con un 1,7% de impureza de hierro y un porcentaje menor al 1% de estaño.

En la Figura 3.37 se muestra una fotografía de la fase metálica obtenida al fundir los empaques Blister pirolizados en mufla, con la adición de una carga fundente formada por Bórax, Fluoruro de calcio y Hierro metálico en polvo, alcanzando un porcentaje de recuperación del 28,5%.

Figura 3. 37. Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 2.

3.8.2. RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO ENSAYO 3 DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Al realizar un análisis químico por absorción atómica de la fase metálica obtenida en el proceso de fusión, para analizar varios elementos metálicos, se tiene los resultados indicados en la Tabla 3.24.

Tabla 3. 24. Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 3.

Elemento	Porcentaje	Elemento	Porcentaje
Al	99,7	Zn	<0,01
Fe	0,2	Cu	<0,01
Sn	0,02	Cr	<0,01
Mg	<0,01		

El análisis químico del Ensayo 3 muestra un porcentaje de aluminio mayor al del Ensayo 2 (99,7%), con impurezas de hierro en menor porcentaje (0,2%). El porcentaje de estaño no ha variado con respecto al ensayo anterior.

En la Figura 3.38 se muestra una fotografía de la fase metálica obtenida al fundir los empaques Blister pirolizados en Horno Nichols, sin la adición de carga fundente obteniéndose recuperaciones del 32,9% de fase metálica.

Figura 3. 38. Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 3.

3.8.3. RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO ENSAYO 4 DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Al realizar un análisis químico por absorción atómica de la fase metálica obtenida en el proceso de fusión, para analizar varios elementos metálicos, se tiene los resultados indicados en la Tabla 3.25.

Tabla 3. 25. Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 4.

Elemento	Porcentaje	Elemento	Porcentaje
Al	97,6	Zn	<0,01
Fe	0,3	Cu	<0,01
Sn	0,05	Cr	<0,01
Mg	<0,01		

En el Ensayo 4, el análisis químico muestra un porcentaje de aluminio menor al Ensayo 3 (97,6%), mientras que el hierro y el estaño aumentaron su porcentaje.

En la Figura 3.39 se muestra una fotografía de la fase metálica obtenida al fundir los empaques Blister pirolizados en Nichols, con la adición de una carga fundente formada por Cloruro de Sodio, obteniéndose una recuperación del 7,9%.

Figura 3. 39. Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 4.

3.8.4. RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO ENSAYO 5 DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Al realizar un análisis químico por absorción atómica de la fase metálica obtenida en el proceso de fusión, para analizar varios elementos metálicos, se tiene los resultados indicados en la Tabla 3.26.

Tabla 3. 26. Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 5.

Elemento	Porcentaje	Elemento	Porcentaje
Al	95,0	Zn	<0,01
Fe	0,3	Cu	<0,01
Sn	0,02	Cr	<0,01
Mg	<0,01		

En el Ensayo 5, el porcentaje de aluminio al realizar el análisis por absorción atómica es menor al obtenido en los Ensayos 3 y 4. El porcentaje de hierro y estaño permanecen casi invariables.

En la Figura 3.40 se muestra una fotografía de la fase metálica obtenida al fundir los empaques Blister pirolizados en Nichols, con la adición de una carga fundente formada por Bórax, Fluoruro de calcio y Hierro metálico en polvo, obteniéndose una recuperación del 8% de fase metálica.

Figura 3. 40. Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 5.

3.8.5. RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO ENSAYO 6 DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Al realizar un análisis químico por absorción atómica de la fase metálica obtenida en el proceso de fusión, para analizar varios elementos metálicos, se tiene como resultado que existe un 100% de aluminio.

En la Figura 3.41 se muestra una fotografía de la fase metálica obtenida al fundir las láminas metálicas retirada manualmente de los empaques tipo “Blisters” sin la adición de carga fundente, obteniéndose una recuperación del 89,9%.

Figura 3. 41. Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 6.

3.8.56. RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO ENSAYO 7 DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Al realizar un análisis químico por absorción atómica de la fase metálica obtenida en el proceso de fusión, para analizar varios elementos metálicos, se tiene un resultado similar al obtenido en el Ensayo 6, es decir un 100% de aluminio.

En la Figura 3.42 se muestra una fotografía de la fase metálica obtenida al fundir las láminas metálicas obtenidas del proceso de disolución sin la adición de carga fundente, obteniéndose recuperaciones del 66%.

Figura 3. 42. Fotografía fase metálica obtenida en el proceso de fusión Ensayo 7.

3.8.8. RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO ENSAYO 8 DE FUSIÓN DE EMPAQUES TIPO BLISTER

Al realizar un análisis químico por absorción atómica de la fase metálica obtenida en el proceso de fusión, para analizar varios elementos metálicos, se tiene los resultados indicados en la Tabla 3.27.

Tabla 3. 27. Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de producto de fusión Ensayo 8

Elemento	Porcentaje	Elemento	Porcentaje
Al	90,9	Zn	<0,01
Fe	0,5	Cu	<0,01
Sn	0,09	Cr	<0,01
Mg	<0,01		

El análisis químico muestra un porcentaje de aluminio del 90,9% con impurezas de 0,5% de hierro y 0,09% de estaño.

En la Figura 3.43 se muestra una fotografía de la fase metálica obtenida al fundir las láminas metálicas obtenidas del proceso de disolución, con la adición de una carga fundente formada por Bórax, Fluoruro de calcio y Hierro metálico en polvo, obteniéndose una recuperación del 35%.

Figura 3. 43. Fotografía fase metálica y fase escoria obtenida en el proceso de fusión Ensayo 8.

Comparando los diferentes análisis químicos realizados, se puede observar que un aluminio de menor pureza es obtenido al utilizar diferentes cargas fundentes, como: Bórax, Fluoruro de calcio, Hierro metálico en polvo y Cloruro de Sodio, como se demuestra en los Ensayos 2, 4, 5 y 8.

Además, las mayores recuperaciones se obtienen al fundir las láminas de aluminio sin la adición de ninguna carga fundente, como se observa en los Ensayos 3, 6 y 7.

Así mismo es posible observar que el proceso de pirolisis tiene una marcada diferencia al ser desarrollado sea en una mufla artesanal o en el Horno Nichols, presentando este primero mejores condiciones para obtener aluminio de mayor pureza, como se indica en los Ensayos 2 y 5.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Los envases Tetra Pak, tienen en su composición de un 5 - 10% de aluminio, el cual puede ser separado físicamente mediante el proceso de hidroatrición al 15% de sólidos durante un tiempo de 2-4 horas y luego por un proceso térmico de pirolisis obteniéndose láminas metálicas que pueden ser fundidas.

- En el proceso hidroatrición – pirolisis el mayor porcentaje de recuperación, cerca de un 14%, se obtiene al fundir las láminas Al – PE añadiendo como carga fundente cloruro de sodio.

- La mejor carga fundente en la recuperación de aluminio en el proceso hidroatrición – incineración es aquella formada por Bórax, Fluoruro de Sodio e Hierro metálico, obteniéndose un 54% de fase metálica.

- Los envases sometidos al proceso de pirolisis y luego fundidos, dan como resultado el mayor porcentaje de recuperación frente a los otros dos procesos planteados, llegando a recuperaciones del 97% sin la necesidad de añadir carga fundente, y controlando la entrada de oxígeno al material.

- El porcentaje de aluminio presente en los empaques tipo “Blister” representa un 25% del peso total del empaque.

- En la recuperación de aluminio de los empaques tipo “Blister”, en el proceso disolución plastificante – fusión, se obtienen recuperaciones del 66% de aluminio puro sin la adición de carga fundente.

- En el proceso pirolisis – fusión, se obtienen recuperaciones 28,5% de aluminio puro utilizando una carga fundente formada por 100% de Bórax, 20% de Fluoruro de calcio y 20% de Hierro metálico (porcentajes en peso)

- El proceso fusión - extracción manual, es el proceso en el que mejores resultados se obtiene, con una recuperación del 89,9% de aluminio puro sin la adición de fundentes.

RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis económico profundo de los procesos planteados para la recuperación de aluminio de los envases post – consumo de la industria de alimentos y farmacéutica.

- Desarrollar un método de disolución de material plástico en los envases Tetra Pak, como alternativa a los procesos planteados en este trabajo.

- Plantear un método de selección de envases post – consumo de la industria de alimentos y farmacéutica, con el fin de tener estadísticas que ayuden a industrializar los procesos de recuperación de aluminio.

BIBLIOGRAFÍA

- Inche Mitma J, Canto Vergiú J, et *al*., 2007, "Diseño y evaluación de una planta de reciclaje de envases Tetra Pak a pequeña escala", Scielo, Perú, Facultad de Ingeniería Industrial, Instituto de Investigación. (Enero, 2007)

- "Generalidades de los envases de brick" Suelos y residuos, Ambientum, 2003. (Enero 2007)

- Tetra Pak España, 2008, "Qué sucede con los cartones para bebidas usados?" , , www.cartonbebidas.com (Marzo 2007)

- Industrias y Servicios, "Envases. Un camino al consumidor", www.scribd.com/doc/320024/conferencia-envases (Marzo 2007)

- Composición y reciclaje del Tetra Brick, 2007, www.bedoce.com/2007/09/06/composición-y-reciclaje-del-tetra-brick/#more-284 (Enero 2007)

- Neves Luiz F., "Novos Desenvolvimentos para reciclagem de embalagens longa vida", Brasil, 2003, www.afcal.pt/destinoFinal/NovosDesenvolvimentosReciclagem.pdf. (Enero 2007)

- Solvay Martorell, 2008, "Procesos de fabricación. Obtención del PVC". (Marzo 2007)

- Quiminet, 2006, "Termoselladora de Blister", www.quiminet.com.mx/pr3/Termoselladdora+de+blister.htm. (Abril 2007)

- Solvay Vinyloop^{R}, 2007, "Process in details", www.vinyloop.com/processcheme/details/0,,39538-2-0,00.htm. (Abril 2007)

- Zeverhoven R., Saeed L., 2000, "Two-stage combustion of high-PVC solid waste with HCl recovery", Helsinki University of Technology, www.//eny.hut.fi/research/combustion_waste/publications/non-reference/torontoE.pdf. (Abril 2007)

- Hernández Férez M., 2007, "Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados", Universidad de Alicante. (Marzo 2007)

- Teng et al., 1995; Giavarini, 1985; Roy et al., 1990, « Pirolisis ». (Enero 2007)

- Feneau C., 2002, « Non –ferrous metals », Unicore, pp. 18-25.

- Universidad tecnológica de Pereira, 2000, « Fusión de aluminio », www.utp.edu.co/~publio17/laboratorio/fusion_al.htm. (Marzo 2007)

- Pagliarussi R., 2001, Noticias e Destaques, “Aluminio Reciclado Gera Riqueza”, www.reciclabeis.com.br. (Enero 2007)

- Foundry Solutions and Design, Groteke et *al*, 2000, “Reducción de costos de fusion del aluminio, mediante control de procesos y equipos”. (Marzo 2007)

- Endara D., 2004, “Recuperación de aluminio de los envases Tetrapack mediante un proceso de pirolisis, fusión y lixiviación”, Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Quimica, EPN, Quito, Ecuador.

- Dietrich B., “Simple methods for identification of plastics”, 1999, Fourth edition, Carl Hanser Verlag, Munich.

ANEXO I

CARACTERIZACIÓN FISICA DE MATERIA PRIMA

1. Humedad: Se pesa 1 gramo de muestra de materia prima en una caja Petry, se coloca en la estufa a 110ºC por 12 horas, se pesa la muestra al final, se resta el peso final menos el inicial y se obtiene el porcentaje de humedad presente en la muestra.

2. Volátiles: En un crisol previamente tarado, se coloca 1 gramo de muestra, se pesa el crisol más la muestra; se coloca en una mufla a 700 – 750ºC tapado por siete minutos, se saca la muestra a un desecador, se deja enfriar y se pesa al final el crisol con muestra. Se restan estos dos pesos y se obtiene el porcentaje de volátiles presentes en la muestra.

3. Cenizas: El mismo crisol que se utilizó para realizar las pruebas del porcentaje de volátiles, se lo lleva nuevamente a la mufla a 950ºC sin tapa durante 2 horas, se saca al desecador, se deja enfriar y se pesa. Se resta el peso inicial con el peso final y se obtiene el porcentaje de cenizas de la muestra.

4. Carbón fijo: Para obtener el porcentaje de carbón fijo, se resta de 100 el porcentaje de volátiles y ceniza obtenidos anteriormente.

ANEXO II

FICHAS TÉCNICAS DE PRUEBAS DE PIROLISIS

2.3.1. Primera prueba de Pirolisis: Muestra original de Tetra Pak

Datos Operacionales

Carga inicial (M1): 2178,1 gramos

Carga inicial (M2): 2182,1 gramos

Carga inicial (M3): 2015,0 gramos

Carga inicial (M4): 2555,8 gramos

Carga inicial (M5): 1878,0 gramos

Tabla 2. 9. Datos Operacionales del Horno Nichols Herreshoff de la primera prueba de Pirolisis.

CONDICIONES OPERATORIAS								
OBS.	HORA	Temperatura [ºC]	Caudal Aire [Pa] [mmH2O]	Caudal Gas[pg] [mmH2O]	Lambda	Presión Horno [mmH2O]	Agitación [RPM]	Presión Alta gas [psig]
1	08:20	300	65	25	1,01	0	4	30
2	10:30	580	35	23	0,78	0	4	18
3	10:40	560	35	24	0,76	0,5	4	18
4	11:40	620	35	24	0,76	0,5	4	14
5	12:25	560	20	13	0,77	0,5	4	22
6	13:15	620	15	10	0,76	0,5	4	16
7	14:10	580	15	10	0,76	0,5	4	13
8	15:45	590	15	10	0,76	0,75	4	10
9	17:30	620	10	6	0,78	0,75	4	14
10	19:30	640	10	6	0,78	0,75	4	10

OBSERVACIONES
1.- Se encendió el horno
2.- Se cambió a atmósfera reductora
3.- Se cargó M1
4.- Se sacó M1
5.- Se cargó M2
6.- Cambio de lambda
7.- Se sacó M2 y se cargó M3
8.- Se saco M3 y se cargó M4
9.- Se sacó M4 y se cargó M5
10.- Se sacó M5 y se apagó el horno

2.3.2. Segunda prueba de Pirolisis: Prueba de fusión de Tetra Pak pirolizado

Datos Operacionales

Carga inicial (M1): 21,4 gramos de Tetra Pak pirolizado en un crisol con carga fundente formada por Bórax, Fluoruro de Calcio, Hierro en polvo y 106,1 gramos de aluminio puro.

Carga inicial (M2): 22,3 gramos de Tetra Pak pirolizado en un crisol con 92,2 gramos de aluminio puro.

Tabla 2. 10. Datos Operacionales del Horno Nichols Herreshoff de la segunda prueba de Pirolisis.

CONDICIONES OPERATORIAS								
OBS.	HORA	Temperatura [ºC]	Caudal Aire [Pa] [mmH2O]	Caudal Gas[pg] [mmH2O]	Lambda	Presión Horno [mmH2O]	Agitación [RPM]	Presión Alta gas [psig]
1	08:15	400	65	25	1,01	0	4	19
2	12:20	720	25	15	0,74	0,15	4	22
3	12:40	700	25	15	0,74	0,5	-	20
4	14:30	760	25	15	0,74	1,0	-	16
5	15:57	760	25	15	0,74	0,75	-	12
6	16:13	740	25	15	0,74	1,0	-	12
7	17:20	760	25	15	0,74	1,0	-	10

OBSERVACIONES
1.- Se encendió el horno
2.- Se cambió lambda
3.- Se metió muestra M1
4.- Se puso crisol M1 en un tiesto
5.- Se sacó M1 y se puso M2
6.- Se puso M1 con carga fundente
7.- Se sacó M1 y se apagó el horno

2.3.3. Tercera prueba de Pirolisis: Pirolisis de Tetra Pak luego del proceso de hidropulper

Datos Operacionales

Carga inicial (M1): 2746,6 gramos

Tabla 2. 11. Datos Operacionales del Horno Nichols Herreshoff de la tercera prueba de Pirolisis.

CONDICIONES OPERATORIAS								
OBS.	HORA	Temperatura [ºC]	Caudal Aire [Pa] [mmH2O]	Caudal Gas[pg] [mmH2O]	Lambda	Presión Horno [mmH2O]	Agitación [RPM]	Presión Alta gas [psig]
1	14:35	640	10	7	0,74	0,5	4	14
2	19:00	640	10	7	0,74	0,5	4	14

OBSERVACIONES
1.- El horno ya estaba prendido, se colocó muestra Tetra Pak hidropulpeado
2.- Se sacó muestra Tetra PAk hidropulpeado

Nota: El horno se abrió a las tres horas de pirolisis, pero se veía claramente la presencia de material volátil, específicamente el polietileno todavía presente en los envases luego del proceso de hidroatrición.

2.3.4. Cuarta prueba de Pirolisis: Prueba de pirolisis de empaques tipo "Blisters"

Datos Operacionales

Carga inicial (M1): 282,1 gramos

Carga inicial (M2): 259,6 gramos

Carga inicial (M3): 206,8 gramos

Carga inicial (M4): 222,9 gramos

Tabla 2. 4. Datos Operacionales del Horno Nichols Herreshoff de la cuarta prueba de Pirolisis.

CONDICIONES OPERATORIAS								
OBS.	HORA	Temperatura [ºC]	Caudal Aire [Pa] [mmH2O]	Caudal Gas[pg] [mmH2O]	Lambda	Presión Horno [mmH2O]	Agitación [RPM]	Presión Alta gas [psig]
1	09:30	340	65	26	1,03	2	4	68
2	10:14	480	35	24	0,76	1,5	4	68
3	10:35	500	35	24	0,76	0,5	4	68
4	11:25	560	25	15	0,74	1,0	4	48
5	12:00	560	25	15	0,74	0,5	4	48
6	13:10	600	15	15	0,76	1,5	4	40
7	14:00	560	15	10	0,76	0	4	40
8	16:00	600	15	10	0,76	0,5	4	37

OBSERVACIONES
1.- Se encendió el horno
2.- Se cambió a atmósfera reductora
3.- Se metió muestra M1
4.- Se cambió flujo de gas y aire
5.- Se sacó M1 y se puso M2
6.- Se cambió flujo de gas y aire
7.- Se sacó M2 y se puso M3
8.- Se sacó M3 y se puso M4