

**OBTENCIÓN DE AGLOMERADOS A PARTIR DE LA REUTILIZACIÓN DE
POLIMETILMETACRILATO (PMMA) Y PAPEL PERIODICO POST-CONSUMO.**

ASTRID MARCELA SÁENZ LESMES.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

**OBTENCION DE AGLOMERADOS A PARTIR DE LA REUTILIZACIÓN DE
POLIMETILMETACRILATO (PMMA) Y PAPEL PERIODICO POST-CONSUMO.**

ASTRID MARCELA SÁENZ LESMES.

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniera Química.**

Director

JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ GALLEGO.

Químico M. Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

*A mis padres Néstor y Mary por su apoyo, por sus consejos y sacrificios
Gracias por creer en mí, por todo el amor que me
Han dado, por todos estos años de dedicación
Porque son un gran ejemplo y uno de los motores
De mi vida. Los amo.*

*A mi hermana
Por Tus consejos, Tu cariño,
Por Tu ayuda y por ser esa persona
Tan especial en mi vida.*

*A Jaime
Por tus consejos, por estar
Conmigo cuando más lo necesité
Gracias por toda tu ayuda, tu apoyo.*

*A mi tía Tere
Por quererme y educarme
Gracias por todo tu cariño.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por la oportunidad que me dio al acogerme en su seno y permitirme formarme como profesional.

Al profesor José Carlos, Director de este trabajo por sus orientaciones, consejos y todo su apoyo académico, intelectual y científico.

A los técnicos del laboratorio de ingeniería química, por su ayuda y disposición.

A todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la elaboración de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. MARCO CONCEPTUAL.....	14
1.1 POLIMETILMETACRILATO (PMMA).....	14
1.2 PAPEL POST CONSUMO.....	15
1.3 MATERIAL COMPUESTO.....	16
1.4 MATERIAL COMPUESTO AGLOMERADO.....	16
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	20
2.3 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	20
2.4 SOLUBILIDAD DE PMMA EN TOLUENO.....	21
2.5 ELABORACIÓN DE LAS LÁMINAS DE PAPEL.....	22
2.6 OBTENCIÓN DEL AGLOMERADO.....	22
2.7 CARACTERIZACIÓN DEL AGLOMERADO.....	24
2.7.1 Test de llama.....	24
2.7.2 Degradación química.....	25
2.7.3 Prueba de permeabilidad.....	25
2.7.4 Determinación de la densidad.....	26
2.7.5 Resistencia a los agentes atmosféricos.....	26
2.7.6 Propiedades Mecánicas.....	27
2.7.6.1 Prueba de dureza.....	27
2.7.6.2 Prueba de Impacto.....	27
2.7.6.3 Ensayo de tracción.....	28

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ALGOMERADOS	29
3.1.1 Test de llama	29
3.1.2 Degradación química.	29
3.1.3 Prueba de permeabilidad	30
3.1.4 Determinación de la densidad.....	32
3.1.5 Resistencia a los agentes atmosféricos	33
3.1.6 Propiedades Mecánicas.....	34
3.1.6.1 Ensayo de dureza	34
3.1.6.2 Ensayo de impacto	35
3.1.6.3 Ensayo de tracción	36
4. CONCLUSIONES	38
5. RECOMENDACIONES.....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología seguida para realización del proyecto.	19
Figura 2: Solución de PMMA y tolueno.	20
Figura 3 Láminas de papel reciclado	22
Figura 4. Test de llama.	25
Figura 5. Degradación química.	25
Figura 6. Prueba de dureza	27
Figura 7: Prueba de impacto	28
Figura 8. Prueba de tracción	28
Figura 9 Resultados test de llama	29
Figura 10.a Prueba con NaOH	30
Figura 11: Resultados resistencia a agentes atmosféricos	34

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Propiedades del PMMA.	15
Tabla 2: Solubilidad del PMMA en Tolueno	21
Tabla 3. Porcentaje de PMMA en las láminas de papel.	23
Tabla 4. Porcentajes de PMMA y papel en los aglomerados.	24
Tabla 5. Resultados prueba de permeabilidad	31
Tabla 6: Resultados determinación de la densidad	32
Tabla 7: Resultados prueba de dureza	34
Tabla 8. Resultados prueba de impacto	35
Tabla 9: Resultados prueba de tracción	36

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN DE AGLOMERADOS A PARTIR DE LA REUTILIZACIÓN DE POLIMETILMETACRILATO (PMMA) Y PAPEL PERIODICO POST-CONSUMO*

AUTOR: SÁENZ LESMES Astrid Marcela**

PALABRAS CLAVE: Polimetilmetacrilato, aglomerado, papel, solución polimérica.

DESCRIPCIÓN

Anualmente se gastan grandes cantidades de papel, que es uno de los productos que más encontramos en la vida cotidiana y que por diversas razones está siendo desechado, lo que implica un impacto ambiental negativo y reciclarlo se convierte en una alternativa viable para evitar la contaminación. Los materiales compuestos buscan mejorar las propiedades tanto físicas como químicas de dos o más componentes combinados a nivel macroscópico.

En el presente trabajo se han preparado aglomerados formados por una matriz polimérica (polimetilmetacrilato) reforzados con fibra de papel estudiándose la relación que existe entre la cantidad de papel y polímero presentes en estos materiales y sus propiedades finales, con el fin de obtener un material compuesto que pueda ser utilizado como sustituto de la madera pero con propiedades superiores a la misma.

Se obtuvieron seis tipos de aglomerados que diferían en su concentración de polímero y papel, los cuales fueron sometidos a diferente tipo de pruebas de caracterización mecánicas y químicas que mostraron que tienen características similares a la madera manifestando el potencial aprovechamiento de estos residuos sólidos. Se atribuyó valor agregado a un material que es considerado como desecho, dando la posibilidad de reducir la contaminación generada por éste, además garantizando un material compuesto económico.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director José Carlos Gutiérrez Gallego. Químico M. Sc

ABSTRACT

TITLE: OBTAINING OF AGGLOMERATED FROM THE REUSE OF POLYMETHYL METHACRYLATE (PMMA) AND NEWSPAPER POST-CONSUMER*

AUTHOR: SAENZ LESMES Astrid Marcela **

KEY WORDS: Polymethyl methacrylate, agglomerates, paper, polymeric matrix.

DESCRIPTION

Each year who people use big amount of paper, this is one of the products that we can find early that more used in the daily life and for many different reasons is discarding, therefore there is a negative impact to environment and recycling it has been an alternative for avoid contamination. Composites materials seek to improve the physical and chemical properties of two or more components combined macroscopic level.

In the present work it has presented the of agglomerates made for a polymeric matrix reinforced with paper fiber studying the relation tween to the amount of paper with the polymer present in this material and its final properties, with the intention to get a compound material can be used as substitute wood and it has better properties that this one.

The result obtained was six types of agglomerates with differences in the amount of paper and polymers, which had been summited in the different test in the laboratory for characterization chemistries and mechanics, which showed it similar characteristics with the wood, for that the waste show that the potential for a better use. It was attributed and added value for material, which is considered as a waste, providing the possibility to diminish the pollution generate by this, moreover guarantying a feasible composed material.

.

* Work degree

** Physicochemical Faculty of Engineering. School of Chemical Engineering. Director José Carlos Gutiérrez Gallego. Químico M. Sc

INTRODUCCIÓN

En Colombia se genera 27,000 toneladas de residuos al día, de los cuales, solo el 10% son aprovechadas para el reciclaje, el otro 90% va a parar a los botaderos a cielo abierto, enterramientos o rellenos sanitarios ^[12]. De este preocupante panorama surge la necesidad de buscar entre esos desechos materiales que puedan volver a ser utilizados y evaluar las condiciones de procesamiento que permitan obtener productos útiles a partir de estos materiales. Uno de estos residuos es el polimetilmetacrilato (PMMA), ya que debido a sus múltiples aplicaciones tanto en la industria como en la medicina, se usa y se desecha rápidamente contando con un ciclo de vida corto y generando un gran impacto ambiental.

Por otra parte, el papel es el responsable de grandes daños al medio ambiente, por lo que reciclarlo se convierte en una de las alternativas para reducir el impacto generado desde su fabricación (por la tala de árboles), hasta su disposición final (por la eliminación). Esto ayudaría a la reducción de residuos sólidos, ahorro de energía y preservación de recursos naturales, evitando el uso de la madera como materia prima para su elaboración y dándole un nuevo uso al papel post-consumo.

Por todo lo anterior el objetivo de este proyecto es la elaboración y caracterización de aglomerados a partir de PMMA y papel post-consumo con el fin de crear una nueva alternativa que ayude a reducir el impacto ambiental y reciclar papel, obteniéndose así un producto cuyas características son aún mejores a las de las maderas comunes, ya que no se ve afectado ni por la humedad, ni por los insectos, son muy resistentes y tienen bajo impacto ambiental por estar hechos con materias primas recicladas.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 POLIMETILMETACRILATO (PMMA)

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un polímero termoplástico que se obtiene por la polimerización del metacrilato de metilo y su presentación más frecuente en la industria es en gránulos o láminas. Los gránulos son para el proceso de inyección o extrusión y las láminas para termoformado o para mecanizado.

El PMMA o Acrílico es el mejor de los plásticos en cuanto a su resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado. No obstante, presenta una baja resistencia al impacto que, con todo, es seis veces superior a la del vidrio normal. Tiene una dureza elevada, superficie pulible ^[8].

La franja de temperaturas de uso continuo se extiende de -40 a $+75$ °C. A partir de 180°C se convierte en líquido viscoso (inyectable, moldeable). La dilatación térmica es media. Por lo que respecta a las propiedades ópticas, tiene una excelente transparencia. Es brillante y absolutamente incoloro, y se puede teñir con facilidad en colores translúcidos u opacos. Es un buen aislante eléctrico, con cargas electrostáticas altas, por lo que tiene tendencia a acumular polvo.

Resiste los ácidos y álcalis de concentración baja o media. Es también resistente a los disolventes apolares (hidrocarburos alifáticos, aceites). Por el contrario, no es resistente a disolventes polares (ésteres, cetonas, hidrocarburos clorados y similares) ^[4]. En la tabla 1 se muestran algunas propiedades del PMMA.

Tabla 1: Propiedades del PMMA.

PROPIEDAD	Valor
Absorción de agua en 24 horas	0,2%
Densidad (g/cm³)	1,19
Alargamiento a la rotura (%)	2,5-4
Módulo de tracción (GPa)	2,4-3,3
Resistencia a la tracción (MPa)	80
Resistencia al impacto Izod (J/m)	16-32

Fuente: www.goodfellow.com/S/Polimetacrilato-de-Metilo.html

1.2 PAPEL POST CONSUMO

El papel comúnmente está hecho de madera procesada y contiene primariamente celulosa, que le da al papel sus características principales. Cuando el papel está recién fabricado es de color blanco y sin ningún tipo de color. Sin embargo, la madera contiene lignina y ésta también se encuentra en la mayoría de papel y es la responsable de que éste se torne de color amarillento con el paso del tiempo y la exposición al sol y al aire ^[7].

Existen tres categorías de papel que pueden utilizarse como materia prima para papel reciclado: molido, desechos de pre-consumo y desechos de post-consumo. El papel molido son recortes y trozos provenientes de la manufactura del papel, y se reciclan internamente en una fábrica de papel. Los desechos pre-consumo son materiales que ya han pasado por la fábrica de papel, y que han sido rechazados antes de estar preparados para el consumo. Los desechos post-consumo son materiales de papel ya utilizados que el consumidor rechaza, tales como viejas revistas o periódicos, material de oficina, etc.

El papel que se considera adecuado para el reciclaje es denominado "desecho post-consumo" [2].

El papel y la industria papelera en general es uno de los sectores industriales mejor posicionados de cara al desarrollo sostenible. El ciclo del papel, controlando la contaminación es cerrado y sostenible. Los árboles fijan CO_2 que queda almacenado en forma de biomasa. Los bosques son un sumidero natural de CO_2 , calculándose su capacidad en un millón de toneladas secuestradas de CO_2 por cada 50.000 Ha de bosques [7]. En Colombia en promedio se consume 1,1 millones de toneladas de papel al año, de las cuales el 63% se abastece con la producción nacional [10].

1.3 MATERIAL COMPUESTO

Un material compuesto está formado por dos o más materiales los cuales al combinarse forman una estructura mucho más resistente que la estructura de sus componentes aislados [11].

El material compuesto más simple está formado por dos componentes

- La matriz que sirve como sustancia de aglutinamiento, las características de ésta suministran un excelente comportamiento frente a la corrosión y una destacada ligereza.
- La fase dispersa o material de refuerzo que permite una mejora en las propiedades mecánicas (resistencia y rigidez) [3].

1.4 MATERIAL COMPUESTO AGLOMERADO

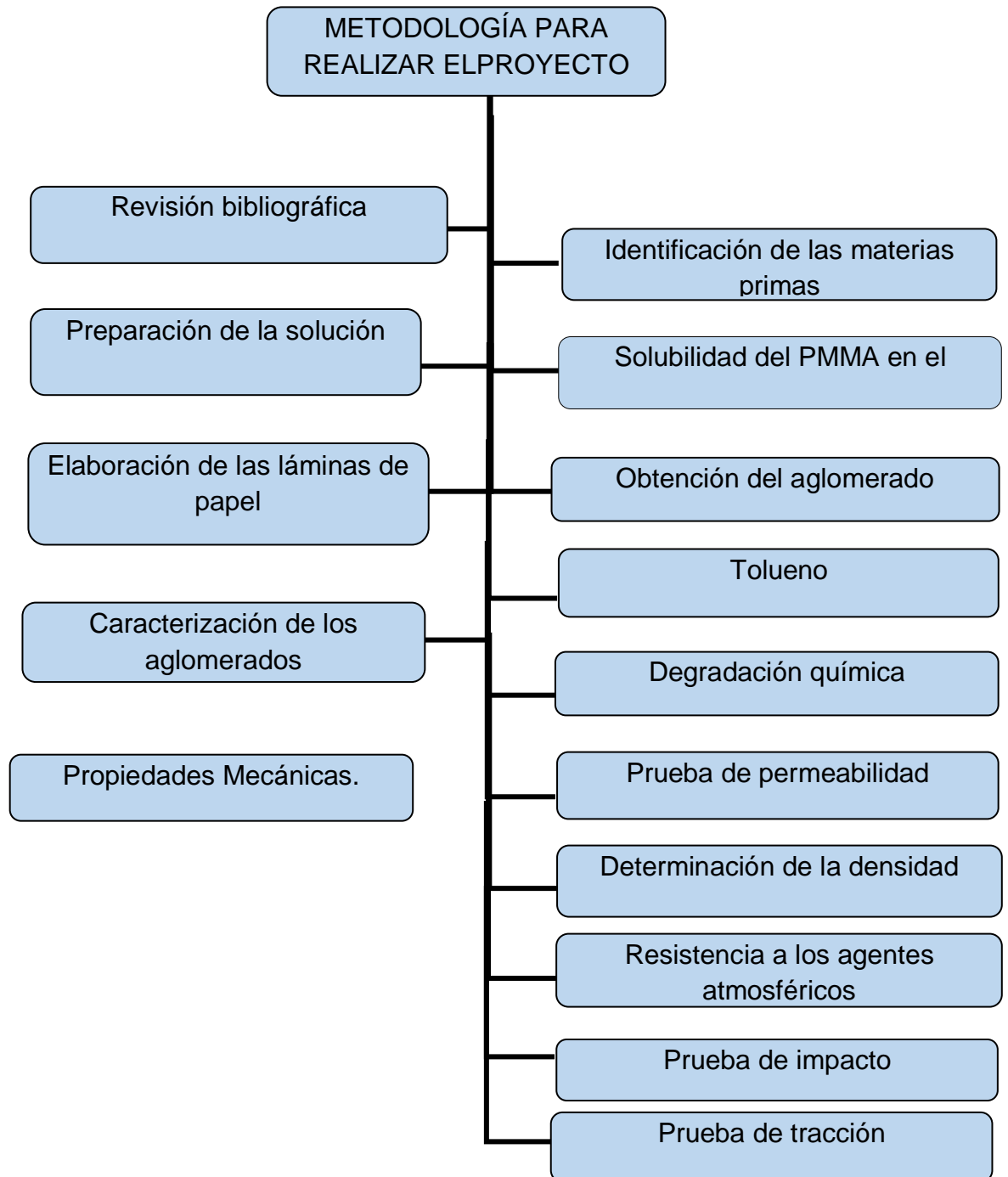
Los aglomerados son materiales compuestos estables y de apariencia uniforme

que pueden estar hechos por una o varias capas del mismo material, adheridas entre sí. Las propiedades resultantes dependen de las características de sus componentes y del número de capas que lo compongan, por lo que se pueden ser de capa única o multicapas. Estos últimos pueden ser unidireccionales o con orientación en diferentes direcciones. En los materiales isotrópicos las propiedades son las mismas en cualquier dirección en un punto dado; en un material anisotrópico las propiedades van a ser diferentes en todas las direcciones en cualquier punto. El procesamiento de estos materiales presenta retos para lograr transmitir la carga a través de la interface (fibra/matriz), ya que estas une las fibras con la matriz y actúa como un medio que distribuye a las fibras los esfuerzos aplicados; por lo tanto una unión débil causa la presencia de imperfecciones superficiales que conducen a la fractura del material y es en este punto donde se define la estructura del mismo ^[19].

2. METODOLOGÍA

La metodología usada para elaboración y caracterización de los aglomerados a base de polimetilmetacrilato y papel post-consumo, se muestra en la figura 1 y a lo largo del capítulo se describirán las diferentes técnicas empleadas en el desarrollo del presente trabajo.

Figura 1. Metodología seguida para realización del proyecto.



Fuente: Autora

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Dentro de esta etapa se recolectó toda la información disponible sobre las propiedades físicas y químicas del polimetilmetacrilato y el papel, además se estableció el método para fabricar los prepregs y los aglomerados.

2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Se realizó la recolección de materias primas, PMMA y papel periódico para su posterior tratamiento, teniendo en cuenta que fueran material post-consumo.

2.3 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN

En esta etapa se redujo todo el PMMA disponible para el desarrollo del proyecto. A éste se le agregó tolueno y se agitó hasta lograr una contextura líquida y homogénea de la mezcla, como se muestra en la figura 2.

Figura 2: Solución de PMMA y tolueno.



Fuente: Autora

2.4 SOLUBILIDAD DE PMMA EN TOLUENO

Se realizaron pruebas preliminares a fin de saber la cantidad de PMMA presente en la solución polimérica, iniciando se pesó un vidrio de reloj luego se le adicionó una cantidad de solución, se pesó nuevamente, se llevó al horno a una temperatura de 130⁰C hasta obtener una película plástica. Se pesó para obtener la cantidad de sólidos disueltos de PMMA en la solución. En la tabla 2 se muestran los datos de la solución con la que se elaboraron los aglomerados.

Tabla 2: Solubilidad del PMMA en Tolueno

	Masa (g)
Vidrio de reloj	43,81
Vidrio reloj + solución polimérica	50
Vidrio reloj + polímero	44,41
Solución	6,19
Polímero	0,6
Tolueno	5,59
% P/p polímero/solución	10
% P/p tolueno/solución	90

Fuente: Autora

2.5 ELABORACIÓN DE LAS LÁMINAS DE PAPEL

Esta parte del procedimiento se hizo de forma manual primero se picó el papel, se dejó dos días en un recipiente con agua, luego se licuo, se pasó por un tamiz con el fin de retirar la suciedad, se extendió en plásticos, se dejó secar a temperatura ambiente por 48 horas aproximadamente y se hicieron recortes de forma rectangular con las siguientes dimensiones: 10,5 cm de ancho y 11,5 cm de largo, como se muestra en la figura 3.

Figura 3 Láminas de papel reciclado



Fuente: Autora

2.6 OBTENCIÓN DEL AGLOMERADO

Para obtener los aglomerados finales se procedió a impregnar las láminas de papel con la solución polimérica, luego se dejaron secar por periodo de 3 horas a temperatura ambiente.

A fin de saber con qué proporción de PMMA y papel se obtendría un mejor aglomerado se realizaron tres tipos de láminas con diferente cantidad de solución y así escoger la más adecuada para la elaboración del aglomerado. En la tabla 3

se muestran los de las láminas para elaborar los prepregs.

Tabla 3. Porcentaje de PMMA en las láminas de papel.

Muestra	%P/p de PMMA	%P/p de Papel
1	18,12	81,88
2	22,55	77,45
3	34,96	65,04

Fuente: Autora

La muestra 1 fue descartada debido a que no había una distribución homogénea de las fibras en la solución y como consecuencia presentaba espacios vacíos de fibra, mientras que las muestras 2 y 3 se pudo notar una buena adherencia del polímero al papel, mejor apariencia y una resistencia mayor a la anterior por lo que fueron escogidas para la elaboración de los aglomerados finales.

Luego de tener las láminas listas, se procedió a fijar las condiciones de prensado. Primero se estableció la temperatura a la cual trabajaría la prensa, según la literatura el rango de la temperatura debería estar 120⁰C y 140⁰C, valores en los que ni las fibras ni el polimetilmetacrilato se degradarían por el calor y el polimetilmetacrilato logra endurecerse, basado en esto se procedió a realizar un primer ensayo fijando una temperatura de 120⁰C con una lámina con 22,55% de PMMA, terminado este ensayo se consideró aumentar la temperatura de prensado a fin de que el PMMA se alcance a fundir y el material final tuviera una buena consistencia. Las condiciones a las que se elaboraron los aglomerados finalmente fueron de 140⁰C y una presión de 1,2149 MPa. Además de esto, otro factor importante fue la cantidad de láminas que se iban a prensar, por lo que se obtuvieron 6 muestras diferentes, las cuales fueron posteriormente caracterizadas

a fin de estimar sus propiedades físicas y químicas. En la tabla 4 se muestran los aglomerados finales.

Tabla 4. Porcentajes de PMMA y papel en los aglomerados.

Muestra	Número de láminas	%P/p de PMMA	% P/p de papel
1	2	22,55	77,45
2	3	22,55	77,45
3	4	22,55	77,45
4	2	34,96	65,04
5	3	34,96	65,04
6	4	34,96	65,04

Fuente: Autora

2.7 CARACTERIZACIÓN DEL AGLOMERADO.

Luego de la elaboración de los aglomerados se procedió a la cortar las diferentes probetas de acuerdo a las normas establecidas para su posterior caracterización.

2.7.1 Test de llama. La prueba fue realizada en el Laboratorio de Procesos de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, donde los aglomerados fueron expuestos a la llama de un mechero FISHER.

Primeramente, se procedió a acercar una muestra del material al borde de la llama, de modo que se quemara directamente con el fin de observar la facilidad de ignición, auto extinción de la llama, color de la llama, desprendimiento de algún olor, como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Test de llama.



Fuente: Autora

2.7.2 Degradación química. Esta prueba se realizó de acuerdo a la norma ASTM D543 ^[14]. Se tomaron muestras de cada aglomerado y se sometieron a contacto con varias sustancias químicas, utilizando 25 ml de cada solución durante un período de cinco días a temperatura ambiente, las sustancias y las concentraciones son las siguientes:

- H_2SO_4
- HCl
- NaOH

Todas estas sustancias a una concentración del 10% P/p. En la figura 5 se muestran las soluciones de la prueba de degradación química.

Figura 5. Degradación química.



Fuente: Autora

2.7.3 Prueba de permeabilidad. Los aglomerados se sumergieron en un

recipiente con un volumen de 30 ml de agua durante 24 horas con el fin de observar la capacidad del material para ser atravesado por un fluido sin alterar su estructura interna. La diferencia de peso se utiliza para calcular el contenido de humedad de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$\text{porcentaje de absorción de agua (\%)} = \frac{(m_w - m_0)}{m_0} \times 100$$

Donde:

M_w = masa del aglomerado húmedo medida en gramos

M_0 = masa del aglomerado seco medida en gramos

Esta prueba se realizó de acuerdo a la norma ASTM D570 ^[15]

2.7.4 Determinación de la densidad. Para realizar este cálculo se tuvo en cuenta el principio de Arquímedes ^[5] y el peso de las muestras a utilizar, luego se sumergió la muestra en una probeta con 70 ml agua, se leyó el volumen que desplazó se reemplazó en la siguiente ecuación y se obtuvo la densidad de la muestra.

$$d = \frac{m}{v}$$

Donde m es la masa en gramos de la muestra seca y v es el volumen ocupado en ml por la misma.

2.7.5 Resistencia a los agentes atmosféricos. Para esta prueba las muestras fueron expuestas a la intemperie por un período de 15 días, a una temperatura ambiente de 25⁰C en el día y 20⁰C en la noche y a presión atmosférica.

2.7.6 Propiedades Mecánicas. Estas pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química.

2.7.6.1 Prueba de dureza. La prueba de dureza se realizó siguiendo la norma ASTM D2240 ^[18] con el fin de observar la resistencia que tenía el aglomerado a la deformación plástica localizada. Esta prueba se realizó con seis muestras en cuatro puntos diferentes, con la ayuda de un durómetro Shore tipo D, basado en el siguiente principio: un cuerpo penetrador es presionado continuamente en el material a medir con una fuerza determinada. Se mide la deformación en el punto de presión y de esta manera se obtiene el valor de la dureza del material como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Prueba de dureza



Fuente: Autora

2.7.6.2 Prueba de Impacto. Se realizó la prueba de impacto Izod. Para este ensayo se cortaron 18 probetas según norma ASTM D256 ^[17]. Con la ayuda del manual de la máquina se registraron los datos, los cuales se determinaron sacando un promedio del ángulo de desplazamiento del martillo para cada muestra, de la misma forma se promediaron los datos para la resistencia al impacto de la máquina. Finalmente con el diagrama de pérdidas totales de energía para la máquina tipo izod se determinó la resistencia al impacto real del aglomerado ensayado. En la figura 7 se muestra las imágenes de las probetas antes y después del ensayo y de la máquina Izod.

Figura 7: Prueba de impacto



Fuente: Autora

2.7.6.3 Ensayo de tracción. El ensayo de tracción se realizó, con el fin de conocer la resistencia del aglomerado al someterlo a una fuerza gradualmente aplicada. Para esta prueba fue necesario elaborar 18 probetas según la norma ASTM D638 ^[16]. Los ensayos se llevaron a cabo en la máquina modelo TWO SPEED DRIVE, la cual proporcionaba una gráfica donde se relacionaba el desplazamiento de las mordazas y la deformación de la probeta, con ayuda del manual de la máquina de ensayo, se calculó el esfuerzo, y posteriormente se hizo el diagrama de esfuerzo vs deformación para cada una de las muestras. En la figura 8 se puede ver una imagen de la máquina usada y de las probetas a ensayar.

Figura 8. Prueba de tracción



Fuente: Autora

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ALGOMERADOS

3.1.1 Test de llama En las muestras se observó una llama de combustión de color amarillo intenso, con un pequeño centro azul y un color rojo en la parte superior, con poco desprendimiento de gases y un olor a flores, debido al polimetilmetacrilato. La combustión fue completa y la llama siguió ardiendo luego de retirarse del fuego hasta consumir toda la muestra. En la figura 9 se muestran las imágenes del test de llama.

Figura 9 Resultados test de llama



Fuente: Autora

3.1.2 Degradación química. En esta prueba se pudo observar gran resistencia de las muestras en los medios ácidos que se vio evidenciado en la no variación física de las mismas, debido a que el PMMA presenta gran resistencia a los ácidos. Sin embargo, cuando las muestras se pusieron en contacto con el hidróxido de sodio se tornaron de color café y la solución tomó un color amarillo pálido que se fue oscureciendo al pasar de los días causados por el desprendimiento de la lignina, ya que ésta reacciona con la soda caustica formando compuestos solubles, por lo

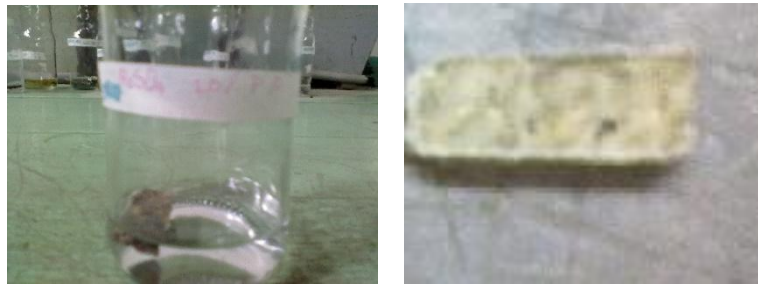
que las muestras perdieron consistencia. En la figura 10 se muestran las imágenes de la prueba de degradación química.

Figura 10.a Prueba con NaOH



Fuente: Autora

Figura 10.b Prueba con H₂SO₄



Fuente: Autora

Figura 10.c Prueba con HCl



Fuente: Autora

3.1.3 Prueba de permeabilidad Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5

Tabla 5. Resultados prueba de permeabilidad

% P/p PMMA	% P/p de Papel	Número de láminas de papel	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% Absorción
22,55	77,45	2	0,58	0,64	10,34
22,55	77,45	3	0,91	1,00	9,89
22,55	77,45	4	0,96	1,05	9,37
34,96	65,04	2	0,46	0,50	8,69
34,96	65,04	3	0,96	1,04	8,33
34,96	65,04	4	1,11	1,20	8,11

Fuente: Autora

Esta prueba mostró una superioridad en cuanto a la resistencia de la muestra con 34,96% de PMMA y cuatro láminas de papel, debido a que un aumento en el contenido de polimetilmetacrilato protege la fibra de la humedad y deformación por hinchamiento.

Esta situación puede estar correlacionada con la densidad, pues como se puede observar en la tabla 6, el tablero de mayor densidad fue el más compacto y por lo tanto el menos permeable. Por el contrario el tablero menos denso fue el de mayor absorción, indicativo de que es un tablero con más espacios vacíos. Comparativamente los valores promedio del contenido de humedad obtenidos por Zambrano Poveda ^[20], en su estudio sobre las elaboración de aglomerados a partir de poliestireno expandido y papel post-consumo fueron del 14,29%, y los valores obtenidos del porcentaje de absorción de agua en este estudio se encuentran en un rango del 8,11 a 10,34%. Comercialmente el porcentaje de absorción de agua de aglomerados está dentro de un rango del 10 a 12% según la Revista El mueble y La madera en su estudio sobre tableros aglomerados para tableros

hechos a base de madera aglomerada (STMUF) ^[13], lo cual demuestra que los aglomerados son comercialmente competitivos.

3.1.4 Determinación de la densidad En esta prueba se pudo observar que al aumentar la cantidad de polimetilmetacrilato aumenta el peso final de los aglomerados, lo que disminuye los espacios vacíos de la probeta aumentando así su densidad. Los resultados se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6: Resultados determinación de la densidad

% P/p PMMA	%P/p de Papel	Número de láminas de papel	Peso (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
22,55	77,45	2	0,61	1,5	0,41
22,55	77,45	3	1,03	1,9	0,54
22,55	77,45	4	1,21	2,1	0,55
34,96	65,04	2	1,10	2,5	0,44
34,96	65,04	3	1,47	2,6	0,56
34,96	65,04	4	1,73	2,9	0,59

Fuente: Autora

Al revisar la norma colombiana NTC2261^[9] donde se establecen las características que deben cumplir los tableros de madera u otros materiales lignocelulosos, los aglomerados que contienen dos láminas de papel están dentro de la clasificación de tableros de baja densidad, por estar por debajo de 500kg/m³, esto le da una ventaja frente otros materiales, ya que presentan buenas propiedades mecánicas

y además son livianos, características que actualmente se buscan en materiales compuestos, por la facilidad tanto de transporte, como de manufactura para uso en interiores y ambientes secos; mientras que los aglomerados con tres y cuatro láminas se pueden clasificar dentro de materiales de densidad media, ya que según la norma dichos valores se encuentran dentro de un rango de 500 kg/m^3 a 800 kg/m^3 , éstos se pueden utilizar como tapas de mesas y bancos de trabajo, como lienzo para pintar, como base para maquetas, como base trasera y fondo de cajones en muebles y como trasera de portafotos, posters. También se usa para hacer formas, para tallar e incluso para hacer esculturas (pegando varios tableros para obtener un grosor adecuado). Otros trabajos han obtenido valores de densidad similares como el caso de Amado, María; Campbell Héctor Enrique; García Ángel quienes en su estudio sobre Madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica ^[1] obtuvieron valores de 0.449 g/ml para la madera alder y 0.522 g/ml para la madera plástica hecha con un 30% P/p de paja y un tamaño de partícula de 2; esto demuestra que los aglomerados son adecuados por ser ligeros y con alta rigidez.

3.1.5 Resistencia a los agentes atmosféricos El comportamiento de la muestra frente a los agentes atmosféricos fue bueno, ya que durante este periodo no presentó deterioro, ni envejecimiento, debido a que este polímero presenta gran resistencia a la intemperie, al moho, no se ve atacado por las bacterias del suelo; lo que hace a los aglomerados resistentes y adecuados para posibles aplicaciones donde tenga contacto con el medio ambiente. En la figura 11 se muestra el aglomerado puesto a la intemperie.

Figura 11: Resultados resistencia a agentes atmosféricos



Fuente: Autora

3.1.6 Propiedades Mecánicas

3.1.6.1 Ensayo de dureza Los datos que se muestran en la tabla 7 se muestran los resultados de la dureza promedio luego de realizar cuatro mediciones a cada probeta.

Tabla 7: Resultados prueba de dureza

%P/p PMMA	% P/p de Papel	Número de láminas de papel	Dureza (shore)
22,55	77,45	2	27,66
22,55	77,45	3	29,66
22,55	77,45	4	33,33
34,96	65,04	2	31,33
34,96	65,04	3	30,66
34,96	65,04	4	36,66

Fuente: Autora

En la prueba se pudo observar que los aglomerados presentaron una resistencia baja a ser rayados, esta característica es muy importante ya que es un material de fácil manipulación con herramientas utilizadas en la industria, es decir, puede ser torneada, cepillada, perforada y atornillada con las mismas herramientas con la que se trabaja la madera natural. El número de láminas, tuvo gran influencia ya

que los aglomerados con cuatro láminas presentaron mayor resistencia al rayado, la cantidad de polímero fue otro factor determinante, ya que los aglomerados que presentaron mejor comportamiento fueron los que contenían 34,96% de PMMA y cuatro láminas de papel.

3.1.6.2 Ensayo de impacto En la tabla 8 se reportan los resultados de la prueba de impacto.

Tabla 8. Resultados prueba de impacto

Aglomerado %P/p PMMA	% P/p de papel	Ángulo	Energía absorbida (J)	Energía total de pérdida (J)	Resistencia real al impacto (J)
22,55	77,45	109,5	0,99	0,64	0,35
34,96	65,04	110,7	0,9	0,66	0,24

Fuente: Autora

Al realizar la prueba se pudo observar que el número de láminas de papel no tuvo relevancia en los resultados obtenidos, ya que el valor del ángulo y la energía absorbida por las probetas era el mismo en las muestras de 2, 3 y 4 láminas, razón por la cual se han reportado los resultados obtenidos según la cantidad de polímero presente en las muestras.

Comparativamente los resultados obtenidos Zambrano Poveda ^[20], (0,61J), deja apreciar el aporte que le da el PMMA a los aglomerados finales mejorando el comportamiento frágil de papel, sin embargo comparando los resultados con la resistencia del PMMA (16-32)^[6] se observó que la resistencia disminuyó, lo cual indica que la incorporación de la fibra de papel no mejoró dicha resistencia.

3.1.6.3 Ensayo de tracción En la tabla 9 se encuentran los resultados de la prueba.

Tabla 9: Resultados prueba de tracción

Número de láminas de papel	%P/p PMMA	%P/p de Papel	Esfuerzo σ (lbf/pulg)	Deformación E (pulg)
2	22,55	77,45	230,31	0,63
3	22,55	77,45	240,02	0,58
4	22,55	77,45	441,97	0,74
2	34,96	65,04	499,67	0,76
3	34,96	65,04	505,03	1,45
4	34,96	65,04	664,95	1,78

Fuente: Autora

En esta prueba se hizo un análisis del contenido de fibra en el aglomerado final, respecto al diagrama de esfuerzo y la deformación. Se pudo observar que a mayor cantidad de fibra, mayor es el esfuerzo que se requiere para que la probeta del material compuesto se fracture, esto se debe a que la fibra ofrece resistencia al material, sin embargo, dicha resistencia depende de la cantidad de polímero presente en la muestra, en este caso a mayor cantidad de polimetilmetacrilato, el material se hace más resistente.

Finalmente se analizó la prueba de tracción respecto al número de láminas de papel en el aglomerado final. Se pudo observar que los aglomerados de cuatro láminas presentaron un mejor comportamiento, debido a la estabilidad que mostraron las probetas. Los aglomerados de dos capas mostraron un comportamiento frágil. Sin embargo, sus resultados son aceptables ya que según la norma técnica colombiana NTC 2261^[9], los aglomerados obtenidos pueden

clasificarse como tableros de grado bajo, los cuales tienen múltiples aplicaciones industriales como paredes falsa, techos, fondos para cajones, tapas de mesa.

4. CONCLUSIONES

- Se logró tener un material compuesto a partir de materias primas post-consumo, como el papel periódico y PMMA con determinadas propiedades físico-mecánicas, ligero, resistente a las soluciones ácidas, de bajo costo, lo que le da un valor agregado a la utilización de fibras naturales en materiales compuestos de matriz poliméricas post-consumo.
- Los resultados de este proyecto arrojaron que las mejores proporciones de polímero y papel para la obtención de los aglomerados son 34,96% P/p de PMMA y 65,04% P/p de papel.
- El número de láminas influyó de manera significativa en las propiedades finales de los compuestos. Aquellos que tenían dos láminas mostraron un comportamiento más frágil, caso contrario en los compuestos con tres y cuatro fueron más resistentes a los esfuerzos mecánicos.
- Según la norma NTC2261 el material obtenido puede ser utilizado para la elaboración de paredes falsas, techos, divisiones y estantes de librerías.

5. RECOMENDACIONES

- Debido a la inflamabilidad de los aglomerados y en presencia de una fuente de calor y de oxígeno se quema fácil y rápidamente, para esto se puede utilizar los retardantes de llama bromados, silicatos de sodio, los cuales se adicionarían a la hoja en el momento de su fabricación.
- Las diferentes combinaciones de mezclas de papel y PMMA, permiten obtener madera con gran variedad de propiedades, como materiales de apariencia más sólida y elevada resistencia mecánica. Se recomienda realizar pruebas con diferentes concentraciones de papel y polímero variando la presión a la que se elaboraron los aglomerados.
- Para obtener una mejor caracterización del material se recomienda realizar pruebas de flexión, taladrado y clavado.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMADO, María; Campbell, Héctor Enrique; García Ángel. Madera Plástica con paja de trigo y matriz polimérica. Tecnología en Marcha. Vol 26. México 2013. P. 26-38
2. ANONIMO. Como reciclar papel. Disponible en <<http://ingenieros-ambientales.blogspot.com/2012/01/como-reciclar-papel.html>>
3. ANÓNIMO. Materiales Plásticos. Disponible en <<http://materialesplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos/html>>
4. ANONIMO. Polimetilmetacrilato. Disponible en <<http://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/pmma.html>>
5. ANONIMO. Principio de Arquímedes. Disponible en <<http://www.taringa.net/post/ciencia-educacion/9440806/Principio-de-flotacion-de-Arquimedes.html>>
6. ANONIMO. Polimetacrilato de Metilo. Disponible en <www.goodfellow.com/S/Polimetacrilato-de-Metilo.html>
7. CASTELL, Xavier E. Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fango de depuradoras. 2 ed. Barcelona: Días de Santos, 2001, P. 27-297, 299-337

8. CERÓN, Dorian; GÓMEZ, Santiago. Aplicaciones de nuevos complejos metaloceno en polimerización de olefinas. Editorial Dykinson. Madrid. 2010, P. 18-19
9. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tableros para partículas aglomeradas para aplicaciones interiores no estructurales. 2ª Edición Bogotá D.C. ICONTEC. 2003. NTC 2261.
10. MARTINEZ, Jorge. El reciclaje, la forma más fácil de mantener nuestro planeta vivo. 2007. Disponible en <<http://www.gestiopolis.com>>
11. MARZAL, A, Feliu. Proyección de Hilos. Editorial Politex. Barcelona: Primera Edición. 1997. P.85
12. MOYANO, Juan. Materiales Ecológicos. Disponible en <<http://www.electronicallimpiajcm.blogspot.com>>
13. OBREGON, Sánchez, Carolina. Tableros Aglomerados. Disponible en <<http://www.revistamm.com/ediciones/rev52/construcciontableros.pdf>>
14. Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents. ASTM D543-06
15. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM D570-98
16. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM D638-10
17. Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. ASTM D256-10

18. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness. ASTM D2240
19. VILADOMS, WEBER, Juan José. Análisis de los materiales compuestos sometidos a tensión o flexión. México, 2003. Universidad de las Américas Puebla. Disponible en http://www.catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/viladoms_w_jj/portada.html.
20. ZAMBRANO, POVEDA, Luz Mery. Obtención de aglomerados a partir de la reutilización de poliestireno expandido y papel periódico post-consumo. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2011.