

**UTILIZACIÓN DE RESINA POLIÉSTER Y POLICARBONATO POST-CONSUMO
OBTENIDO DE DISCOS COMPACTOS, PARA LA FABRICACIÓN DE
AGLOMERADOS REFORZADOS CON FIBRA NATURAL**



JORGE ALEXANDER RODRÍGUEZ ACEVEDO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

**UTILIZACIÓN DE RESINA POLIÉSTER Y POLICARBONATO POST-CONSUMO
OBTENIDO DE DISCOS COMPACTOS, PARA LA FABRICACIÓN DE
AGLOMERADOS REFORZADOS CON FIBRA NATURAL**

JORGE ALEXANDER RODRÍGUEZ ACEVEDO

**Trabajo de Grado presentado como
requisito para optar al título de Químico**

Director

JOSE CARLOS GUTIÉRREZ, Químico, Msc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

Primero que todo quiero agradecerle a DIOS, a la santísima virgen María por darme sabiduría y fortaleza para alcanzar este importante logro.

A mi hermosa madre, la persona que me sacó adelante, por ser el motor de mi vida, mi apoyo, mi fuente de amor, cariño, comprensión y sobre todo por la paciencia que tuviste durante el tiempo que estuve en la universidad, esto te lo dedico a ti madre.

A mi mejor amigo y hermano Ramón, con el que he cosechado una amistad invaluable desde hace ya 16 años y son innumerables las anécdotas que hemos vivido, gracias por su apoyo y por darme esa mano amiga cuando lo he necesitado.

A Marcela Domínguez, negrita, gracias por llegar a mi vida y brindarme tanto amor, cariño, comprensión, apoyo, en una palabra gracias por darme tanta felicidad, porque tú aparte de ser mi novia eres mi mejor amiga y siempre has estado conmigo en las buenas y en la malas.

AGRADECIMIENTOS

Al maestro JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ, quien además de ser el director del proyecto, fue una fuente de innumerables consejos tanto personales como académicos, por su orientación en el desarrollo del proyecto, por su enorme paciencia y sobre todo por la disposición que siempre tuvo en colaborar cuando se le necesitaba.

A las escuelas de química, ingeniería química y civil por permitir el uso de sus instalaciones y equipos en el desarrollo de la investigación.

A LUIS “EL GORDITO DE ORO” por su enorme colaboración y orientación en el desarrollo de la investigación.

A DIANA, LEO, JAVIER “GOLDBERG”, LUDWING, CARLOS, JOHANSON, JHONY, ELIZABETH y DIDY por brindarme sus consejos y amistad durante todos estos años en la universidad.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO TEÓRICO	20
1.1 MATERIALES PLÁSTICOS	20

1.1.1 Termoplásticos.	22
1.1.2 Termoestables.	23
1.2 RECICLAJE DE PLÁSTICOS	23
1.2.1 Reciclado mecánico.	24
1.2.2 Reciclado químico	24
1.3 EL POLICARBONATO.	25
1.3.1 Historia.	25
1.4 SÍNTESIS DEL POLICARBONATO	25
1.5 COMPORTAMIENTO QUÍMICO DEL POLICARBONATO	27
1.6 PROPIEDADES DEL POLICARBONATO	27
1.7 USOS Y APLICACIONES DEL POLICARBONATO	28
1.8 COMPOSICION DE LOS DISCOS COMPACTOS	29
1.8.1 Soporte de policarbonato.	30
1.8.2 Tintes.	30
1.8.3 Capa reflectiva.	30
1.8.4 Laca de protección acrílica y etiqueta	30
1.9 RESINA POLIÉSTER	31
1.10 CASCARILLA DE ARROZ	32
2. METODOLOGÍA	34
2.1. TRATAMIENTO DEL PC RECICLADO	34
2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL PC POST-CONSUMO	35
2.2.1 Espectroscopia Infrarroja	35
2.2.2 Prueba de Beilstein.	36
2.2.3 Pruebas de solubilidad.	37
2.2.4 Test de pirólisis.	37
2.2.5 Punto de fusión.	38
2.2.6 Densidad aparente	39
2.3 REUTILIZACIÓN DEL PC POST-CONSUMO	40
2.3.1 Diseño experimental del proceso de reciclaje del PC.	40
2.3.2. Determinación del límite de dispersión del PC Post- Consumo en estireno.	42

2.3.3 Preparación de la resina poliéster preacelerada (RPP).	42
2.3.4 Ensayo de compatibilidad entre la RPP y la dispersión PC-Estireno	43
2.3.5 Fabricación de aglomerados reforzados con cascarilla de arroz.	46
2.4 Caracterización de los aglomerados	47
2.4.1 Ensayo de compresión.	48
2.4.2. Ensayo de flexión.	48
2.4.3 Ensayo de impacto.	49
2.4.4 Pruebas de resistencia química.	49
2.4.6 Determinación de la densidad aparente.	50
2.4.7 Test de llama.	50
3. RESULTADOS	52
3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL PC POST-CONSUMO	52
3.1.1 Espectroscopía Infrarroja.	52
3.1.2 Prueba de Beilstein.	54
3.1.3 Pruebas de solubilidad.	54
3.1.4 Test de pirólisis.	56
3.1.5 Punto de fusión.	56
3.1.6 Densidad Aparente.	57
3.2 REUTILIZACIÓN DEL PC POST-CONSUMO	58
3.2.1 Determinación del límite de dispersión del PC Post- Consumo en estireno.	58
3.2.2 Ensayo de compatibilidad entre la RPP y la dispersión PC-Estireno	58
3.2.3 Fabricación de aglomerados reforzados con cascarilla de arroz	60
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS	62
3.3.1 Ensayo de compresión.	62
3.3.2 Ensayo de flexión.	63
3.3.3 Ensayo de impacto.	65
3.3.4 Pruebas de resistencia química.	66
3.3.5 Ensayo de dureza	68
3.3.6 Determinación de la densidad aparente.	69
3.3.7 Test de llama	71

3.4 FORMULACIÓN FINAL DEL AGLOMERADO	71
3.4.1 Comparación de propiedades entre los aglomerados	72
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	81

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Monómero constituyente del policarbonato de bisfenol A.	25
Figura 2. Primera etapa de la síntesis del policarbonato de bisfenol A.	26

Figura 3. Segunda etapa de la síntesis del policarbonato de bisfenol A.	26
Figura 4. Composición de los discos compactos.	29
Figura 5. Reacción general del proceso de polimerización de una resina poliéster.	31
Figura 6. Estructura química de la resina poliéster.	31
Figura 7. Diseño experimental.	34
Figura 8. Discos compactos recuperados (a) y sin etiquetas (b).	35
Figura 9. Molino de cuchillas (c) y cascarilla de arroz (d).	35
Figura 10. Equipo IR.	36
Figura 11. Combustión del PC.	37
Figura 12. Montaje de pirólisis	38
Figura 13. Fusiómetro Fisher Scientific.	39
Figura 14. Montaje de densidad aparente.	40
Figura 15. Dispersión de PC en estireno.	42
Figura 16. Resina Poliéster Preacelerada (RRP).	43

Figura 17. Representación en dos dimensiones del curado de un termoestable: (a) monómeros, (b) crecimiento lineal y ramificaciones por debajo del punto del gel, (c) formación de un gel, reticulación incompleta, y (d) termoestable, curado total. (de Turi, 1981).	44
Figura 18. Representación esquemática de las reacciones elementales que pueden tener lugar en la polimerización radicalaria de una resina de poliéster insaturado (de Stevenson 1986)	45
Figura 19. Prensa hidráulica.	47
Figura 20. Equipo para ensayo de compresión.	48
Figura 21. Equipo para ensayo de flexión.	48
Figura 22. Equipo para ensayo de impacto.	49
Figura 23. Equipo para ensayo de dureza.	50
Figura 24. Montaje para determinar la densidad aparente.	50
Figura 25. Test de llama.	51
Figura 26. IR PC Post-consumo	52
Figura 27. IR PC SADTLER.	53
Figura 28. Llama del PC (a) y Llama del PVC (b) .	54
Figura 29. Pirólisis del PC.	56

Figura 30. Resultados del ensayo de compresión.	62
Figura 31. Resultados del ensayo de flexión.	63
Figura 32. Resultados del ensayo de impacto.	65
Figura 33. Ensayo de dureza.	68
Figura 34. Determinación de la densidad aparente.	70

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Características de la cascarilla de arroz	32

Tabla 2. Señales de espectroscopia IR para el policarbonato.	53
Tabla 3. Pruebas de solubilidad del PC-Postconsumo.	55
Tabla 4. Punto de Fusión del PC.	57
Tabla 5. Densidad del PC.	57
Tabla 6. Límite de Dispersión del PC-Post-consumo.	58
Tabla 7. Compatibilidad entre la RPP y la dispersión PC-Estireno.	59
Tabla 8. Formulación de la matriz polimérica.	60
Tabla 9. Parámetros utilizados en la fabricación de los aglomerados.	60
Tabla 10. Resultados del ensayo de compresión.	62
Tabla 11. Resultado del ensayo de flexión.	63
Tabla 12. Resultados del ensayo de impacto.	65
Tabla 13. Resultados de pruebas de resistencia química.	67
Tabla 14. Ensayo de dureza.	68
Tabla 15. Determinación de la densidad aparente.	69
Tabla 16. Formulación final del aglomerado.	72

Tabla 17. Comparación entre aglomerados fabricados con la matriz polimérica compuesta por PC-Es-RPP y aglomerados fabricados con sólo RPP.

72

LISTA DE ANEXOS

	pág
ANEXO A. Normas técnicas	81
ANEXO B. Compatibilidad entre la RPP y la dispersión PC- Estireno	88

ANEXO C. Fabricación de aglomerados reforzados con cascarilla de arroz	91
ANEXO D. Caracterización de los aglomerados	94
ANEXO E. Espectros infrarrojos	99
ANEXO F. Ficha de seguridad del estireno	101

ABREVIATURAS

PC	Policarbonato
PC-Es	Dispersión de PC Post-consumo en Estireno
RPP	Resina Poliéster Preacelerada

PC-Es-RPP Dispersión de PC-Es en Resina Poliéster Preacelerada.

ASTM American Society for Testing and Materials

CM Cascarilla de arroz molid

IR Espectroscopia de infrarrojo

MEK Peróxido de metiletilcetona

RESUMEN

TÍTULO

UTILIZACIÓN DE RESINA POLIÉSTER Y POLICARBONATO POST-CONSUMO OBTENIDO DE DISCOS COMPACTOS, PARA LA FABRICACIÓN DE AGLOMERADOS REFORZADOS CON FIBRA NATURAL*

AUTOR

JORGE ALEXANDER RODRÍGUEZ ACEVEDO**

PALABRAS CLAVES

Polímeros, dispersión, aglomerado, reciclaje, resina poliéster.

El Policarbonato (PC), es un polímero que se utiliza en la industria en la fabricación de discos compactos. Este uso masivo del PC, ha generado un negativo impacto ambiental al igual que otros materiales plásticos fabricados en la actualidad. Después que estos cumplen su ciclo de vida útil en el mercado, son desechados y destinados en su mayoría a botaderos municipales sin la más mínima posibilidad de ser reciclados.

Para mitigar este impacto ambiental, se diseñó un método de reciclaje físico-químico del PC post-consumo, mediante la dispersión del polímero en estireno y posterior incorporación de este a resinas tipo poliéster, hasta en un 40% en peso de la mezcla total. De esta forma se logra la fabricación de materiales sólidos y aglomerados con cascarilla de arroz, con el fin de buscar una aplicación práctica de este tipo de materiales con buenas propiedades aislantes, alta resistencia a la tensión e impermeabilización de superficies lo que permite reincorporar este polímero a la vida útil como también la generación de fuentes de empleo en la recolección y procesado del mismo en la industria.

El PC post-consumo y material fabricado luego del reciclaje, se caracterizó por técnicas espectroscópicas (IR), comportamiento térmico, test llama para polímeros, test de pirolisis, determinación de densidad, propiedades mecánicas, pruebas de aislamiento térmico y pruebas de resistencia química ante sustancias ácido y base.

.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias, Escuela de Química. Director: José Carlos Gutiérrez, Msc.

ABSTRACT

TITLE

UTILIZATION OF RESIN POLYESTER AND POLYCARBONATE POST-CONSUMPTION OBTAINED OF COMPACT DISCS, FOR THE MANUFACTURE OF AGGLOMERATES REINFORCED WITH NATURAL FIBER*

AUTHOR

JORGE ALEXANDER RODRÍGUEZ ACEVEDO**

KEYWORDS

Polymers, dispersion, agglomerate, recycling, resin polyester

The Polycarbonate (PC), it is a polymer that is in use in the industry in the manufacture of compact disks. This massive use of the PC, has generated a negative environmental impact as other plastic made materials at present. After they fulfill their lifecycle in the market, most of them are discarded and destined to the municipal dumps without the slightest possibility of being recycled.

In order to mitigate this environmental impact, a physicochemical recycling method of the PC postconsumer was designed by the dispersion of polymer in styrene and subsequently its incorporation to a type polyester resin, reaching up to 40% Wt (mass percentage) of the total mixture, achieving the manufacture of solid materials and agglomerates made from rice husk, in order to find a practical application of these materials with good insulating properties and waterproofing of surfaces. Fact that besides allowing the reincorporation of this polymer to the useful life generates employment opportunities by its collection and processing in the industry.

After the recycling process, the PC postconsumer and manufactured material was characterized by spectroscopic techniques (IR), thermal behavior, polymer flame test, pyrolysis test, density determination, mechanical properties, thermal insulation test and chemical resistance test with acid and base substances.

*College thesis

**Science Faculty, School of Chemistry. Directed by José Carlos Gutiérrez, Msc.

INTRODUCCIÓN

El policarbonato producido actualmente por diversos fabricantes de materias primas, constituye el primer representante utilizable, desde el punto de vista práctico, de la gran familia de los ésteres altamente polimerizables del ácido carbónico.

La obtención de estos poliésteres no constituye desde luego el resultado de una investigación reciente, ya en 1898 y 1902 se informa sobre tales compuestos. Pero solamente en 1953 los trabajos de desarrollo llevados a cabo en FarbenFabriken Bayer AG, Leverkusen, condujeron a la obtención de una materia termoplástica, cuyos productos de partida son relativamente fáciles de lograr, la cual puede ser moldeada por los métodos usuales de la elaboración de termoplásticos, con un cuadro de propiedades que hizo aparecer su producción como sumamente interesante.

Se hace referencia al derivado 4,4'-dihidroxifenol-2,2-propano denominado Bisfenol A [1]. Este polímero empleado en la fabricación de discos compactos es un substrato con propiedades muy especiales ya que permite el almacenamiento seguro de datos con estructuras de sonidos complejos, textos e imágenes. Además su transparencia, estabilidad dimensional y resistencia a la fractura, hacen de éste un plástico muy novedoso y particular. [2]

Día a día se utiliza y desecha una cantidad considerable de materiales plásticos sin tener en cuenta su baja biodegradabilidad, situación que trae como consecuencia la acumulación y saturación de estos residuos en los rellenos sanitarios.

Es por esto que hoy en día unas de las grandes preocupaciones de la sociedad, es la de tratar de reutilizar dichos productos con el fin de reducir un poco la contaminación ambiental que estos polímeros generan al ser desechados, y sobre todo la de tratar de encontrar nuevos usos para aquellos materiales no biodegradables, como por ejemplo el policarbonato presente en los discos compactos.

Esta investigación consiste en la fabricación de aglomerados para lo cual, se seleccionó la matriz polimérica compuesta por la dispersión de Policarbonato post-consumo obtenido de discos compactos reciclados en estireno y la Resina poliéster preacelerada; esta última es el agente de acoplamiento entre las fibras utilizadas como carga y el polímero, tanto la resina poliéster como el policarbonato son materiales de fácil adquisición y disponibilidad.

Se seleccionó la cascarilla de arroz como material de refuerzo en el material aglomerado, dicha elección se realizó principalmente por la elevada oferta de esta fibra natural y porque sus características físicas y químicas se adaptan correctamente a las necesidades del proceso. Esta elección se llevó a cabo teniendo en cuenta que la utilización masiva de está fibra en materiales compuestos en Colombia, puede representar una solución al problema ambiental que generan actualmente dichos residuos que producen las arroceras en nuestro país.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 MATERIALES PLÁSTICOS

Los polímeros son moléculas esenciales para nuestra existencia, son constituyentes principales de nuestra comida (almidón, proteínas, etc.), de

nuestras ropas (seda, algodón, poliésteres, nylon, etc.), de nuestras casas (madera, pinturas, etc.) y de nuestros cuerpos (ácidos nucleicos, proteínas, etc.).

Un polímero (o una macromolécula) es una especie química de elevado peso molecular, su elevado tamaño se alcanza por la unión repetida de pequeñas moléculas denominadas monómeros.

Se clasifican según su forma o mecanismo de síntesis en polímeros de adición y de condensación:

Los de adición se forman, como su nombre lo indica, mediante reacciones de adición en las cuales los monómeros que intervienen se caracterizan por poseer un doble enlace que al romperse permite que las unidades monoméricas se encadenen entre sí a través de enlaces sencillos.

Los de condensación, como su nombre lo indica, se forman por reacciones de condensación entre monómeros bifuncionales (que tienen un grupo funcional en cada extremo). Estas reacciones siempre van acompañadas de la eliminación de una molécula pequeña como H_2O , HCl , CH_3OH , entre otros. Ejemplos de polímeros de condensación son las poliamidas, los poliésteres y las resinas fenólicas.

Se obtienen generalmente del petróleo crudo o del gas natural mediante una serie de procesos químicos; se conocen como compuestos de la industria petroquímica. Representan del 1.5 al 2% de la producción total de gas natural y de petróleo. Las materias primas necesarias para producir los distintos plásticos son metano, etileno, propileno, benceno, acetileno, naftaleno, tolueno y xileno.

Los polímeros por si mismos no satisfacen todas las demandas tecnológicas para las que son requeridos y solo se utilizan puros en contadas ocasiones; Estos se

convierten en plásticos cuando se mezclan con aditivos, la mezcla de un polímero con aditivos puede mejorar las propiedades físico-mecánicas, eléctricas, fisicoquímicas, su procesabilidad o apariencia.

Las cargas, plastificantes, agentes nucleantes o agentes espumantes modifican las propiedades mecánicas. Los antioxidantes, estabilizadores de calor, absorbedores de luz ultravioleta, y retardadores de llama mejoran el envejecimiento químico. Los lubricantes y agentes antiestáticos cambian las propiedades superficiales. Finalmente, los colorantes, pigmentos y abrillantadores ópticos cambian la apariencia.

El plástico es un material de diseño y construcción que compite con el acero, vidrio y madera. Existen gran variedad y en general, son excelentes materiales aislantes y muy resistentes a la acción química. Sin embargo, el mayor auge de estos materiales no se debe tanto a las propiedades mecánicas que poseen, sino a su bajo costo de fabricación, a su peso ligero y a la facilidad de obtener diferentes formas y colores.

Tienen una gran variedad de aplicaciones industriales y debido a su bajo costo en comparación con otros materiales, el consumo de estos productos ha aumentado significativamente cada año. Además, la resistencia química que presentan estos materiales, hace que la eliminación de los polímeros usados constituya un problema ambiental serio y que aumente conjuntamente con el consumo de los mismos. Teniendo en cuenta su comportamiento físico, principalmente su comportamiento de procesado, los materiales plásticos se dividen en termoplásticos y termoestables. [3]

1.1.1 Termoplásticos. Un termoplástico requiere calor para darle forma y después de enfriado puede ser calentado nuevamente y ablandado por efecto de

la ruptura de las fuerzas de atracción entre las cadenas para ser moldeado. Al enfriarse, se restablecen las fuerzas de atracción y por lo tanto se vuelven a endurecer. Este ciclo de calentamiento-ablandamiento-enfriamiento-endurecimiento puede repetirse indefinidamente.

El calor puede suministrarse por radiación, conducción o mediante un trabajo de cizalla, lo realmente importante es que la masa sea calentada uniformemente para que fluya de forma regular. Por ejemplo, son termoplásticos el policarbonato, el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, las poliamidas y los acrílicos.

1.1.2 Termoestables. Estos plásticos al ser sometidos a calentamiento sufren una alteración tanto química como estructural ya que el rompimiento de los enlaces es irreversible, de manera que al calentarse nuevamente no se pueden volver a moldear. Estos polímeros son en general los reticulados, tales como las resinas epóxicas, los poliuretanos y las resinas fenólicas.

Un termoestable no fluye y por tanto no puede entrecruzarse si ya está entrecruzado. Por lo general, en el proceso el transformador recibe una mezcla que no está totalmente polimerizada denominada prepolímero, la polimerización (entrecruzamiento) se termina durante el proceso de fabricación.

En la transformación nunca se llega a un entrecruzamiento o curado total y de hecho, las propiedades físicas de una resina son función de su grado de curado. [4].

1.2 RECICLAJE DE PLÁSTICOS

1.2.1 Reciclado mecánico. El reciclado mecánico transforma el residuo plástico nuevamente en un material plástico susceptible de aplicaciones idénticas o similares. Es común ver farolas, bancos y accesorios para el cabello fabricados con plástico reciclado.

El reciclado mecánico tiene una serie de limitaciones importantes, por un lado exige fundir y remoldear el plástico por lo que solo se puede aplicar a termoplásticos. Además, tras varios ciclos, el material pierde calidad progresivamente hasta que es inviable cualquier aplicación de interés.

En consecuencia el reciclaje mecánico puede considerarse como un tratamiento intermedio, pues tarde o temprano será necesario eliminar ese residuo plástico mediante otros procedimientos. [5]

1.2.2 Reciclado químico. Normalmente el reciclaje químico depende de la naturaleza del residuo plástico, es decir, si se trata de un polímero de condensación o de adición:

En el primer caso, la depolimerización química convierte el residuo polimérico en los monómeros de partida, que se pueden emplear nuevamente en la fabricación del polímero virgen cerrándose el ciclo completo.

En el caso de los polímeros de adición, no es viable la degradación del residuo plástico a sus monómeros mediante los procesos existentes de reciclado químico, salvo notables excepciones como el craqueo térmico del poliestireno; en este caso, se transforma el residuo plástico en combustibles o en materias primas químicas básicas como lo son el gas de síntesis y los hidrocarburos debajo peso molecular. [6]

1.3 EL POLICARBONATO.

1.3.1 Historia. Desde que Einhorn en 1898 preparó por primera vez policarbonato haciendo reaccionar por separado dihidroxibenceno, hidroquinona y resorcina con fosgeno en solución de piridina, el camino recorrido por estos compuestos químicos, muchos de ellos de amplia utilización en el mundo de los plásticos, ha sido amplio y provechoso.

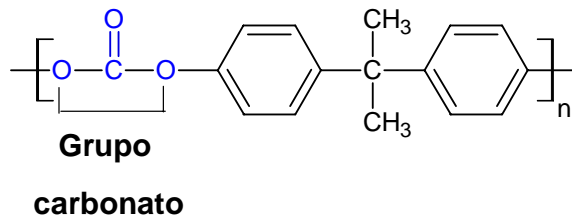
Independientemente de los trabajos llevados a cabo en América por otras firmas, el equipo de la General Electric, investigando para conseguir resinas termoestables de gran estabilidad al calor y a la hidrólisis, obtuvo como subproducto el policarbonato del bisfenol A (2,2-bis (4-hidroxifenil) propano). Así comenzaba en 1958 la producción casi simultánea de los policarbonatos de bisfenol A en Alemania y Estados Unidos. [7]

En los últimos años la gama de policarbonatos comerciales se ha incrementado considerablemente. Las diferencias entre los diversos tipos se deben principalmente a diferencias en el peso molecular, presencia de un segundo componente polihidroxílico y a distintos aditivos. [8]

1.4 SÍNTESIS DEL POLICARBONATO

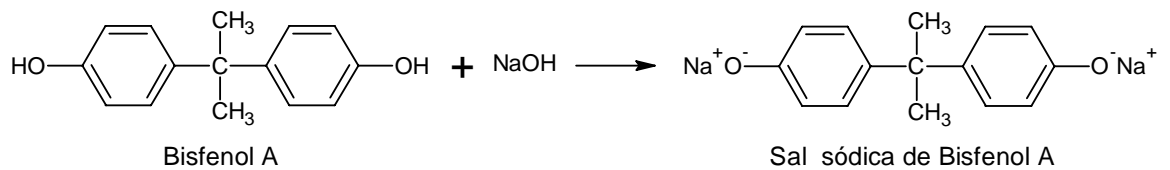
El policarbonato toma su nombre de los grupos carbonato en su cadena principal (**Figura1**). El policarbonato empleado en los discos compactos recibe el nombre de policarbonato de bisfenol A, porque se elabora a partir de bisfenol A empleando fosgeno.

Figura 1. Monómero constituyente del policarbonato de bisfenol A.



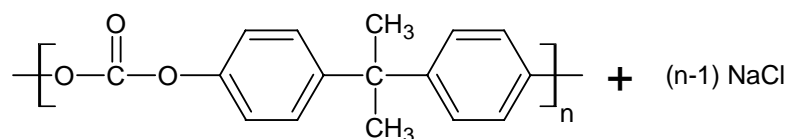
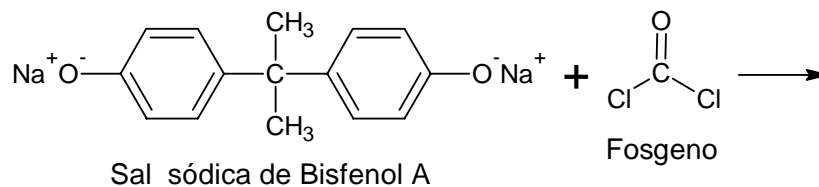
Esto comienza con la reacción del bisfenol A con hidróxido de sodio para dar la sal sódica del bisfenol A.

Figura 2.Primera etapa de la síntesis del policarbonato de bisfenol A.



La sal sódica de bisfenol A reacciona luego con fosgeno (un compuesto bastante desagradable, que era el arma química preferida de la Primera Guerra Mundial), para producir el policarbonato [9].

Figura 3.Segunda etapa de la síntesis del policarbonato de bisfenol A.



1.5 COMPORTAMIENTO QUÍMICO DEL POLICARBONATO

El comportamiento químico del policarbonato frente a los agentes químicos es diverso. Así por ejemplo, presenta una buena estabilidad frente a los ácidos minerales y muchos ácidos orgánicos hasta altas concentraciones. El ácido sulfúrico al 50% no origina ningún daño a temperaturas de 70°C.

La resistencia frente a la acción de los productos de reducción y oxidación es notable. Numerosas grasas y aceites minerales, animales y vegetales, hidrocarburos saturados alifáticos, ciclo alifático y alcoholes, con excepción del alcohol metílico, se comportan igualmente de forma indiferente.

Los álcalis, las soluciones amoniacales y las aminas destruyen el policarbonato; Buenos disolventes son, por ejemplo, el cloruro de metileno, el tricloroetano o el cloroformo, mientras que el benzol, la cetrarina, el tetra cloruro de carbono, los ésteres y cetonas actúan hinchando el producto.

En muchos casos la influencia de los agentes químicos se pone de manifiesto solamente al ser sometido el material a un esfuerzo mecánico mayor o a temperaturas elevadas. [10]

1.6 PROPIEDADES DEL POLICARBONATO

El policarbonato representa un material que por una parte, es sumamente resistente a los golpes y de una elasticidad tenaz y, por otra, su elevado módulo de elasticidad permite la fabricación de objetos moldeados muy rígidos. Lo que caracteriza principalmente al policarbonato, colocándolo por delante de otros termoplásticos, es la sorprendentemente escasa alteración de sus propiedades, al discurrir en forma casi lineal a lo largo de todo intervalo de temperatura

aprovechable, así como su comportamiento al exponerlo a tensiones por tracción o presión.

Sometido a estos esfuerzos, en comparación con otros materiales, el policarbonato sufre una escasa deformación elástica, pero dentro de ciertos límites prácticamente ninguna deformación permanente.

El intervalo de temperatura en el cual pueden emplearse las piezas moldeadas de policarbonato se extiende desde -100°C hasta $+135^{\circ}\text{C}$. El policarbonato a las altas temperaturas mencionadas y más allá de las mismas permanece no solamente termoestable de forma absoluta, sino que además un objeto moldeado conserva realmente sus formas completamente sólidas a temperaturas hasta de $+135^{\circ}\text{C}$ y no presenta ningún encogimiento.

La inocuidad fisiológica constituye un factor esencial para poder emplear el policarbonato en toda clase de objetos que se encuentran en contacto con productos alimenticios o se usan en el sector medicinal. Como además de esto no contiene ningún componente monómero ni aditivos tales como plastificantes y estabilizantes que pudieran ser disueltos o eliminados por el agua, este material puede, por lo que a olor y sabor se refiere, equiparse al vidrio o a la porcelana.
[10]

1.7 USOS Y APLICACIONES DEL POLICARBONATO

En 1964, a poco tiempo de su descubrimiento, ya existían más de 2500 artículos moldeados para los cuales se ha escogido el policarbonato como materia prima. Ha sido aceptado por los sectores de la electrotecnia y electrónica debido a sus buenas propiedades aislantes con una estabilidad a temperaturas hasta de 135°C .

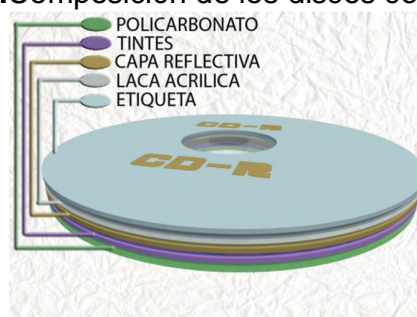
Las cajas de distribución, clavijas de enchufe y cajas de contacto, los interruptores, hasta los microinterruptores terminales se fabrican a base de policarbonato. Las cajas sólidas son resistentes a los golpes, las transparentes, no solo protegen las instalaciones eléctricas sino que también hacen visibles los procesos en su interior.

También se fabrican de policarbonato piezas para instalaciones telefónicas, aparatos de radio y televisores. El policarbonato ha adquirido también gran importancia para elementos de construcción debido al favorable comportamiento térmico [11], pudiendo resistir de forma notable la radiación sin que se alteren sus propiedades. Por esta razón actualmente es muy utilizado en lentes.

Las cubiertas de policarbonato para fuentes de alumbrado se presentan desde luego muy atractivas, pero es en primer lugar el precio de la materia prima algo elevado, lo que limita una aplicación general del policarbonato, aunque se fabrican luces a prueba de explosiones, para las cuales existe un notable interés especialmente en buques-cisterna y automóviles.

1.8 COMPOSICION DE LOS DISCOS COMPACTOS

Figura 4. Composición de los discos compactos.



1.8.1 Soporte de policarbonato. Un disco compacto está compuesto principalmente por policarbonato, aproximadamente en un 90%.

1.8.2 Tintes. Éstos son la parte más frágil de los CD's ya que se deterioran produciendo cambios que afectan en la reflectividad y por lo tanto dando problemas de lectura. Los tipos de tintes más usados son Cianina, Cianina estabilizada con metal, Diazo y Ftalocianina.

1.8.3 Capa reflectiva. El metal más usado para esta capa es el oro que aunque tiene una excelente estabilidad, al ser una capa tan delgada se vuelve muy susceptible a daños por abrasión. Actualmente esta capa está siendo sustituida por plata debido a que es más barata.

1.8.4 Laca de protección acrílica y etiqueta. Estos elementos pueden significar riesgo debido a la contracción generada durante su proceso de manufactura. [12]

1.9 RESINA POLIÉSTER

Las resinas son sustancias líquidas que pueden pasar al estado sólido mediante una reacción química provocada por un agente externo; Por sí solas no tienen la resistencia suficiente, es por eso que necesitan ser reforzados por otros materiales, que son los que aportan la flexibilidad y dureza. Estas resinas se presentan en formas de polímeros termoestables que son los empleados en materiales compuestos.

Figura 5. Reacción general del proceso de polimerización de una resina poliéster.

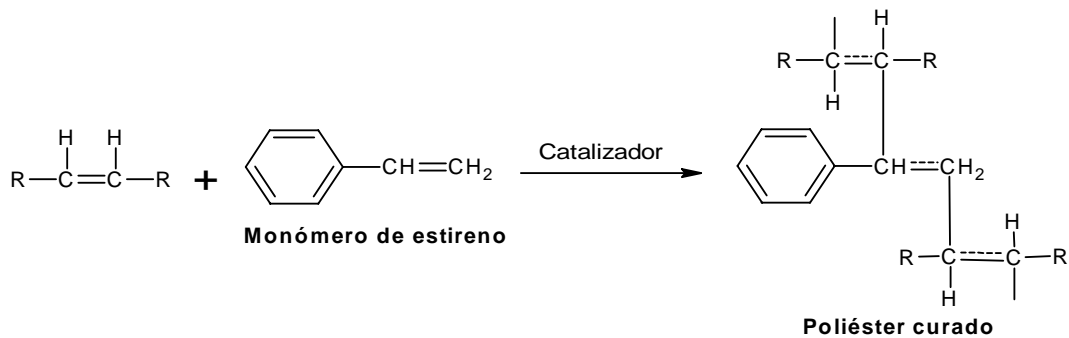
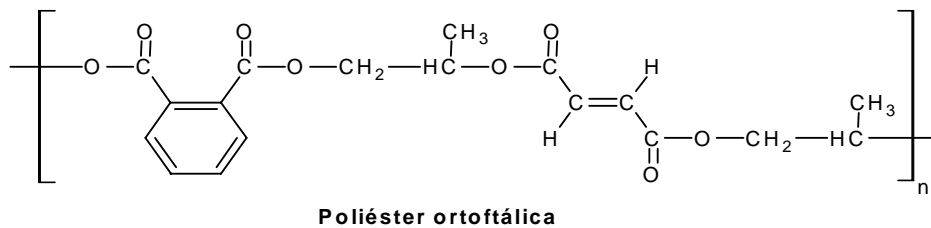


Figura 6. Estructura química de la resina poliéster.



1.10 CASCARILLA DE ARROZ

La cascarilla de arroz es un subproducto de la industria molinera y que ofrece buenas propiedades para ser usado como sustrato hidropónico. Entre sus principales propiedades físico-químicas se tiene que es un sustrato orgánico de baja tasa de descomposición, es liviano, de buen drenaje, buena aireación.

El principal inconveniente que presenta la cascarilla de arroz es su baja capacidad de retención de humedad y lo difícil que es lograr el reparto homogéneo de la misma (humectabilidad) cuando se usa como sustrato único en camas o bancadas [13].

Presenta un alto contenido de Dióxido de Silicio (SiO_2) (Véase **Tabla 1.**), lo cual lo hace imposible de ingerir como alimento, además de contener un bajo contenido de celulosa (40 % aproximadamente), presenta un valor nulo por ser desecho y no se le ha dado un uso adecuado para conferirle un valor agregado y por esto existe la factibilidad de poder utilizarlo como carga o relleno en una matriz polimérica, la cual es el medio donde se inunda la cascarilla de arroz, misma que está compuesta por miles de cadenas poliméricas y un polímero.

En la **Tabla 1** se presentan algunas características de la cascarilla de arroz [14].

Tabla 1. Características de la cascarilla de arroz

Densidad a granel	0,12-0,13 g/ml	Azufre	0,12-1,14%
Capacidad de Intercambio catiónico	2-3%	Hierro	200-400ppm
Retención de humedad	0,10-0,12L/L	Manganeso	200-800ppm
Nitrógeno	0,50-0,60%	Cobre	3-5 ppm

Fósforo	0,08-0,10%	Zinc	15-30 ppm
Potasio	0,20-0,40%	Boro	4-10 ppm
Calcio	0,10-0,15%	Cenizas	12-13%
Magnesio	0,10-0,12%	Sílice(SiO₂)	10-12%
Fibra (celulosa)	39,05%	Lignina	22,80%
Proteínas	3.56%	Extracto no nitrogenado	6.60%

2. METODOLOGÍA

Figura 7. Diseño experimental.



2.1. TRATAMIENTO DEL PC RECICLADO

Se utilizaron discos compactos reciclados a los cuales se les quitó mecánicamente las etiquetas, también se utilizó como fibra natural en la elaboración de los aglomerados cascarilla de arroz, la cual se adquirió de las arroceras de la zona industrial de la ciudad de Bucaramanga. Después se procedió a triturar tanto el PC post-consumo como la cascarilla de arroz, para ello fueron llevados al molino de cuchillas Standard Model No. 3 WileyMill (diseñado en Filadelfia, Estados Unidos por Arthur H. Thomas Co) adecuado con un tamiz de 2mm, presente en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la escuela de Ingeniería Química.

Figura 8. Discos compactos recuperados **(a)** y sin etiquetas **(b)**.



a.



b.

Figura 9. Molino de cuchillas **(c)** y cascarilla de arroz **(d)**.



c.



d.

2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL PC POST-CONSUMO

2.2.1 Espectroscopia Infrarroja. Para realizar este análisis, se tomaron pequeñas muestras de PC post-consumo y se lijaron cada una manualmente hasta obtener una lámina delgada que permitiera generar un espectro definido. Con esto se garantizó que el análisis espectral correspondiera a una muestra en

su estado más puro. Para el análisis se utilizó un equipo **Bruker modelo tensor 27 FT-IR**.

Figura 10. Equipo IR.



2.2.2 Prueba de Beilstein. Esta prueba se realizó con el objetivo de descartar la presencia de compuestos halogenados en la muestra de PC post-consumo. Para esta prueba se calentó un alambre de cobre limpio en una llama de mechero Bunsen hasta que se colocó incandescente. Después se puso en contacto rápidamente el alambre caliente con la muestra de PC post-consumo y se llevó nuevamente el alambre a la llama. Una llama verde demostraba la presencia de algún halógeno.

Figura 11. Combustión del PC.



2.2.3 Pruebas de solubilidad. Para realizar esta prueba, se utilizaron diferentes solventes de tipo comercial, con el fin de determinar en cuál de ellos el PC proveniente de los discos compactos se dispersa en forma parcial o total.

Se tomaron varias piezas de policarbonato y se depositaron en varios frascos a los cuales se les adicionó diferentes solventes para observar su comportamiento químico frente a ellos. Dichas pruebas se realizaron en los siguientes solventes orgánicos:

- Acetona comercial
- Ácido acético glacial
- Estireno
- Benceno
- Cloroformo
- Diclorometano
- Etanol comercial
- Fenol
- Formaldehído
- Tetracloruro de carbono
- Tolueno
- Xileno

2.2.4 Test de pirólisis. Esta prueba se realizó tomando un tubo de ensayo pyrex, el cual consta de una salida lateral (Véase **Figura 12**). Luego se introdujo en este una pequeña muestra del PC post-consumo y se selló completamente la parte superior del tubo, luego se adaptó un pequeño frasco de vidrio en la salida lateral

del tubo de ensayo, donde se encontraba un trozo de papel pH humedecido en agua destilada.

Una vez construido el montaje, se procedió a pirolizar la muestra mediante el uso de un mechero, al punto en que la muestra presentó signos claros de descomposición y emanación de vapores. Estos vapores viajaron por el interior del tubo hasta hacer contacto con el trozo de papel pH humedecido que se encontraba dentro del frasco de vidrio acoplado a la salida lateral del mismo. Esto permitió obtener un valor aproximado del pH de los vapores emanados, por cambio de coloración del papel pH, facilitando la identificación del polímero mediante el uso de tablas registradas en la literatura [16].

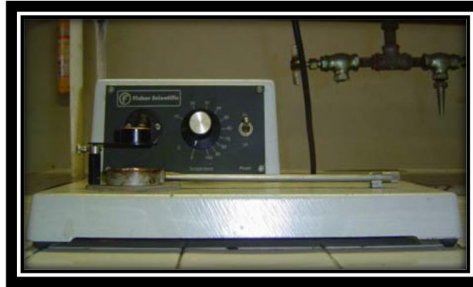
Figura 12. Montaje de pirólisis



2.2.5 Punto de fusión. Este análisis se realizó de manera manual mediante la ayuda de un fusiómetro marca **FISHER SCIENTIFIC**, modelo: **09488**. Se tomaron 3 fragmentos de PC post-consumo los cuales fueron sometidos a un barrido de temperatura de 25°C a 300°C y a una velocidad (1°C/min). Se registró

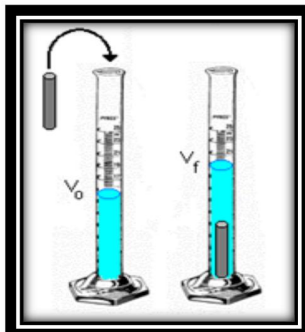
periódicamente el cambio de sus propiedades físicas como color y temperatura de ablandamiento o temperatura de transición vítrea (Tg).

Figura 13. Fusiómetro Fisher Scientific.



2.2.6 Densidad aparente. Para determinar la densidad aparente del PC, fue necesario recurrir al principio de Arquímedes; el cual permite encontrar una relación entre la masa y el volumen de un objeto, mediante la observación de la cantidad de volumen desplazado cuando se sumerge un cuerpo en un líquido. Se inició pesando los fragmentos del polímero, sumergiéndolos en un volumen inicial de agua en una probeta; se midió el volumen desplazado y se determinó la densidad mediante la **Ecuación 1**:

Figura 14.Montaje de densidad aparente.



2.3 REUTILIZACIÓN DEL PC POST-CONSUMO

2.3.1 Diseño experimental del proceso de reciclaje del PC. Para llevar a cabo este diseño experimental de reciclaje del PC post-consumo, se tomó como punto de partida los resultados y observaciones registradas en las pruebas de solubilidad realizadas inicialmente; allí el polímero ante la presencia de los diferentes solventes podía permanecer inalterado, tener un hinchamiento parcial, un hinchamiento total con apariencia de gel granulado o la total homogenización por dispersión en el solvente.

De estas observaciones, se eligieron los solventes que mostraron una buena dispersión del PC, siendo estos la acetona, el cloroformo y el estireno; sin embargo allí se analizó la viabilidad económica del proceso en cuanto al valor de los solventes y su disponibilidad en el mercado, apelando a las restricciones que el país tiene para algunos de ellos como resultado del estatuto de estupefacientes.

Basados en esta premisa se encontró que el cloroformo y la acetona son solventes restringidos en su venta por la legislación colombiana y muy costosos, razón por la cual se decidió emplear el estireno comercial por su mayor

disponibilidad en el mercado, y por ser un solvente activo en los procesos de polimerización vinílica.

Surge ahora un interrogante y es ¿Para qué sirve una dispersión de PC en estireno (PC-Estireno)?, pues allí no se logra dar una solución clara al objetivo de reciclar este polímero. Sin embargo, en la literatura se encontró estudios referentes a la comercialización de productos relacionados con polímeros, donde se menciona el uso actual y extendido de resinas poliéster. [17] Siendo estas la materia prima principal en la fabricación de innumerables productos para la industria automotriz y línea doméstica. Ejemplo de esto es la fabricación de mesones, defensas para automóviles y tinas para baño.

Lo impactante de este producto es que su preparación se hace en forma líquida a temperatura ambiente y que su solidificación se basa en una reacción de polimerización mediante la adición de un catalizador. Esta forma de preparación de la resina poliéster ofreció la posibilidad de mezclarla con la dispersión del PC en estireno.

Una investigación más afondo sobre las propiedades mecánicas de la resina y su preparación, se encontró que para preparar dicha resina se utiliza una mezcla peso a peso de 70% de resina poliéster, 5% Naftenato de cobalto (Agente controlador de la velocidad de polimerización), y 30% de estireno, junto con unas gotas de iniciador (MEK). Este penúltimo ingrediente dio vía libre a los ensayos de mezclado entre la dispersión de PC post-consumo con la resina poliéster. [18], [19], [20]

Ahora surgen un par de interrogantes ¿Cuál es la compatibilidad entre la mezcla de la resina poliéster y la dispersión del PC-Estireno? ¿Qué porcentaje máximo en peso de PC disperso en estireno se puede incorporar a dicha resina?

A partir de los anteriores hallazgos, se realizaron varias pruebas con el fin de obtener la proporción ideal en la cual se pudiera incorporar la máxima cantidad en peso de dispersión PC-Estireno con resina poliéster, sin que la mezcla final presentara fallas estructurales luego de polimerizar completamente.

2.3.2. Determinación del límite de dispersión del PC Post- Consumo en estireno. Para determinar el límite de dispersión se procedió de la siguiente manera: Se colocó 1 ml de dispersión PC-Estireno en un vidrio porta muestra y se llevó a una balanza para registrar su peso (P_i), luego se dejó el vidrio con la dispersión un tiempo determinado con el fin que se evaporara el solvente, posteriormente se llevó el vidrio nuevamente a la balanza y se registró el nuevo peso (P_f), con estos datos se calculó el límite de dispersión de la dispersión. Cabe señalar que este procedimiento se realizó por triplicado.

Figura 15. Dispersión de PC en estireno.



2.3.3 Preparación de la resina poliéster preacelerada (RPP). Esta formulación se realizó peso a peso para 800 g de resina poliéster. Se tomaron 520 g de resina poliéster, luego se le adicionan 240 g. de estireno y por último 40 g. de Naftenato de cobalto. Todo esto se agitó lentamente evitando la incorporación de aire, hasta que se obtuvo una mezcla completamente homogénea.

Figura 16. Resina Poliéster Preacelerada (RRP).



2.3.4 Ensayo de compatibilidad entre la RPP y la dispersión PC-Estireno.

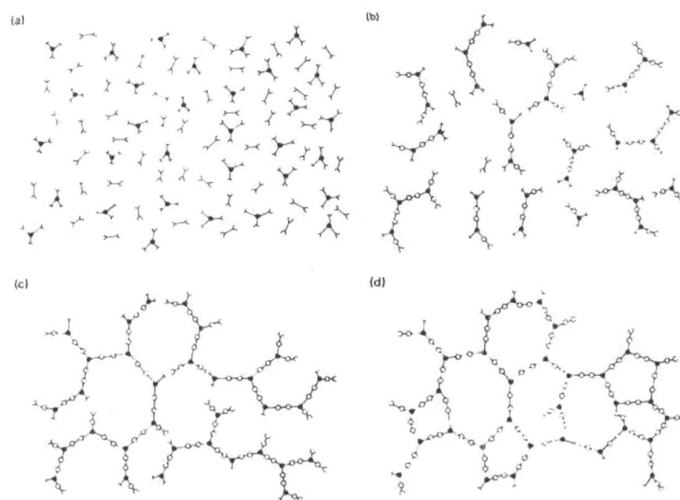
Las resinas termoestables son aquéllas que cambian irreversiblemente bajo la influencia del calor, de la luz, de agentes fotoquímicos y de agentes químicos, pasando de un material fusible y soluble a otro no fusible e insoluble, por la formación de un retículo tridimensional covalente. En el proceso reactivo de entrecruzamiento o de curado, las cadenas poliméricas (reactivos termoplásticos o líquidos) reaccionan entre sí y, a la vez, con un agente entrecruzador, formándose macromoléculas orientadas en todas las direcciones y con numerosos enlaces covalentes entre ellas. El retículo tridimensional formado confiere al material curado unas propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia química muy elevadas que los hacen aptos para múltiples aplicaciones.

Las resinas termoestables, sobre todo las epoxi, las de poliéster insaturado y las de poliuretano, son utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones en las que actúan como matriz o fase continua de un material compuesto.

La reacción de curado es crucial en la utilización del material termoestable. Es importante conocer perfectamente la naturaleza de la misma. El curado de termoestables es complejo e incluye varias etapas. Como se ilustra en la Figura

tal, la química del proceso de curado empieza con la formación y el crecimiento lineal de las cadenas que pronto empiezan a ramificarse y posteriormente a entrecruzarse. A medida que la reacción avanza el peso molecular aumenta rápidamente y varias cadenas se unen en un retículo de peso molecular infinito.

Figura 17. Representación en dos dimensiones del curado de un termoestable: **(a)** monómeros, **(b)** crecimiento lineal y ramificaciones por debajo del punto del gel, **(c)** formación de un gel, reticulación incompleta, y **(d)** termoestable, curado total. (deTuri, 1981).[15]

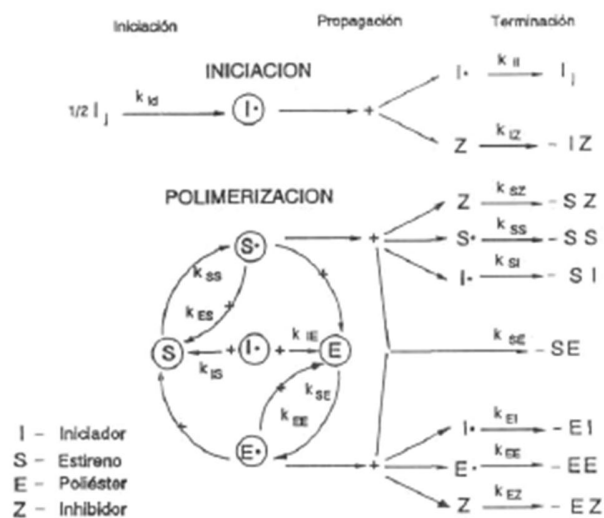


Durante el proceso de curado, las cadenas de poliéster insaturado se unen entre sí y con un monómero reticulado, formándose un retículo tridimensional insoluble. El retículo formado le confiere al material unas propiedades mecánicas y de resistencia química muy elevada y adecuada para las diferentes aplicaciones.

El proceso reactivo de endurecimiento o curado tiene lugar en tres etapas: la iniciación, la propagación y la terminación. Puede iniciarse, generalmente, de dos maneras distintas: por medio de una catálisis térmica o por un proceso de catálisis

inducida químicamente. Ambos métodos dan, como resultado, un proceso depolimerización iniciado por medio de radicales libres. En la catálisis química, usada en desarrollo de los aglomerados, el sistema catalítico está formado por un iniciador y un promotor. Como iniciador, se utiliza el peróxido orgánico Metiletilcetona (MEK) y otras sustancias (promotor) que, al descomponerse generan radicales libres que reaccionan con el poliéster y el estireno. El promotor es una sustancia reductora que descompone el iniciador, incluso a baja temperatura, el Naftenato de Cobalto cumple esta función [15].

Figura 18. Representación esquemática de las reacciones elementales que pueden tener lugar en la polimerización radicalaria de una resina de poliéster insaturado (de Stevenson 1986)[15]



En la propagación los radicales libres del iniciador se usan para abrir los dobles enlaces (formándose nuevos radicales libres), estos reaccionan con el estireno presente o con el poliéster, y a partir de eso se forman las cadenas que irán creciendo y entrecruzándose según tres posibles procesos

reactivos: copolimerización estireno-poliéster, homopolimerización del estireno y homopolimerización del poliéster. Finalmente, tiene lugar la terminación del crecimiento de las cadenas poliméricas. Esto puede darse por medio de alguna de las reacciones denominadas: de agotamiento, en donde se acoplan cadenas crecientes para formar una sola cadena de polímero, o por desproporción, donde un átomo de hidrógeno de un radical polimérico es transferido a otro obteniéndose dos tipos de moléculas, una con un extremo saturado y la otra con un extremo insaturado.

Este ensayo de compatibilidad se realizó en pequeños frascos de vidrio en los cuales se depositó en cada uno de ellos, distintas relaciones peso a peso entre la dispersión PC-estireno y la resina poliéster pre-acelerada. Luego de solidificadas las mezclas preparadas, se procedió a analizarlas en forma ocular para buscar imperfecciones o fallas estructurales, causadas por una deficiente homogenización entre la dispersión del PC-estireno y la RPP. Este análisis se hizo con el fin de encontrar la mejor relación que originara una muestra sólida o matriz polimérica con características físicas y estructurales idóneas para el desarrollo del trabajo.

2.3.5 Fabricación de aglomerados reforzados con cascarilla de arroz. Se prepararon distintas mezclas en relación peso a peso entre la cascarilla de arroz molida (CM) y la matriz polimérica compuesta de PC-Es-RPP, variando la cantidad de los componentes mencionados anteriormente, adicionando un volumen constante de MEK y sometiendo la mayoría de las pruebas a una fuerza de 1 ton durante 20 min en una prensa hidráulica de laboratorio marca CARVER modelo C serie No 22576-514.

El criterio que se tuvo en cuenta para la fabricación de estos aglomerados fue el de preparar una mezcla homogénea, que no resultara ni muy blanda como

tampoco muy dura, es decir, una mezcla ligeramente húmeda que originara un aglomerado con una estructura consistente, al producirse la adhesión de las partículas sólidas de la carga mediante el polímero, para lograr esto se debía evitar el exceso de mezcla polimérica o de cascarilla de arroz, pues los aglomerados no presentaban unas propiedades aceptables para su uso. (Véase **Tabla 9**).

Figura 19. Prensa hidráulica.



2.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS

Inicialmente se eligieron tres muestras de acuerdo con la adherencia, compactación, rigidez, dureza, y la cantidad de matriz polimérica utilizada a las cuales se les realizó diferentes tipos de ensayos. Los ensayos concernientes a compresión, flexión e impacto fueron llevados a cabo en el laboratorio de resistencia de materiales de la escuela de Ingeniería Civil de la UIS.

2.4.1 Ensayo de compresión. Las probetas de forma cilíndrica, con una longitud igual al doble de su diámetro se someten a una carga de compresión en forma axial y centrada en la maquina universal de ensayos MTS 810 AMSLER siguiendo la norma ASTM D 695 (Véase **Anexo A**).

Figura 20. Equipo para ensayo de compresión.



2.4.2. Ensayo de flexión. Los aglomerados empleados tienen forma de tableta rectangular y sobre ellas se aplica una fuerza perpendicular al eje longitudinal. Se tuvo en cuenta la norma ASTM D790 (Véase **ANEXO A**) y se realizó en la maquina universal de ensayos MTS 810 AMSLER.

Figura 21. Equipo para ensayo de flexión.



2.4.3 Ensayo de impacto. El comportamiento del material se determinó impactando con una carga de choque a tabletas rectangulares. Se realizó con un péndulo Charpy, en el equipo de ensayo TREBEL atendiendo la norma ASTM D756 (Véase **ANEXO A**).

Figura 22. Equipo para ensayo de impacto.



2.4.4 Pruebas de resistencia química. Teniendo en cuenta que los ambientes a las que son expuestos los compuestos pueden ocasionar daños en su estructura interna y externa, se llevaron a cabo diferentes pruebas hechas a temperatura ambiente en soluciones al 10% en peso de NaOH y H₂SO₄ durante un periodo de 15 días, de tal manera que se pudieran evidenciar algún deterioro en su apariencia y textura.

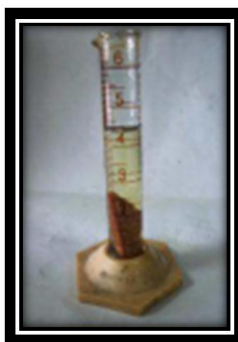
2.4.5 Ensayo de dureza. Se realizó con un durómetro Shore tipo D midiendo la deformación en el punto de presión, así se obtuvo el grado de dureza.

Figura 23. Equipo para ensayo de dureza.



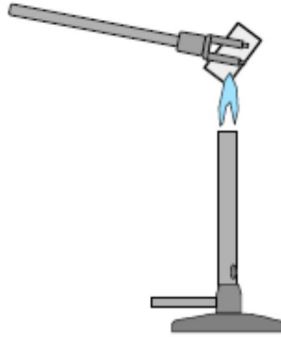
2.4.6 Determinación de la densidad aparente. Tomando el principio de Arquímedes, se usó un líquido inerte y sumergiendo el aglomerado se presupone su volumen. Hallada la relación entre el peso seco del aglomerado y el volumen, se obtuvo su densidad.

Figura 24. Montaje para determinar la densidad aparente.



2.4.7 Test de llama. Este test permite observar el comportamiento del material ante la llama, consiste en tomar una pequeña cantidad del material y someterlo a la acción de la llama; para esto se puede utilizar un mechero bunsen con la entrada del gas al mínimo y se puede analizar la inflamabilidad del material dentro y fuera de la llama, si se enciende o si se forman vapores.

Figura 25. Test de llama.



3. RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL PC POST-CONSUMO

3.1.1 Espectroscopia Infrarroja. El espectro obtenido del policarbonato extraído de los discos compactos (Véase **Figura 26**), presenta claramente las bandas características de cada grupo funcional del policarbonato, esto se puede corroborar al comparar dicho espectro con el espectro del policarbonato de la base de datos Sadtler No 869K (Véase **Figura 27**). Las bandas características y su respectiva longitud de onda se encuentran registradas en la **Tabla 2**.

Figura 26. IR PC Post-consumo

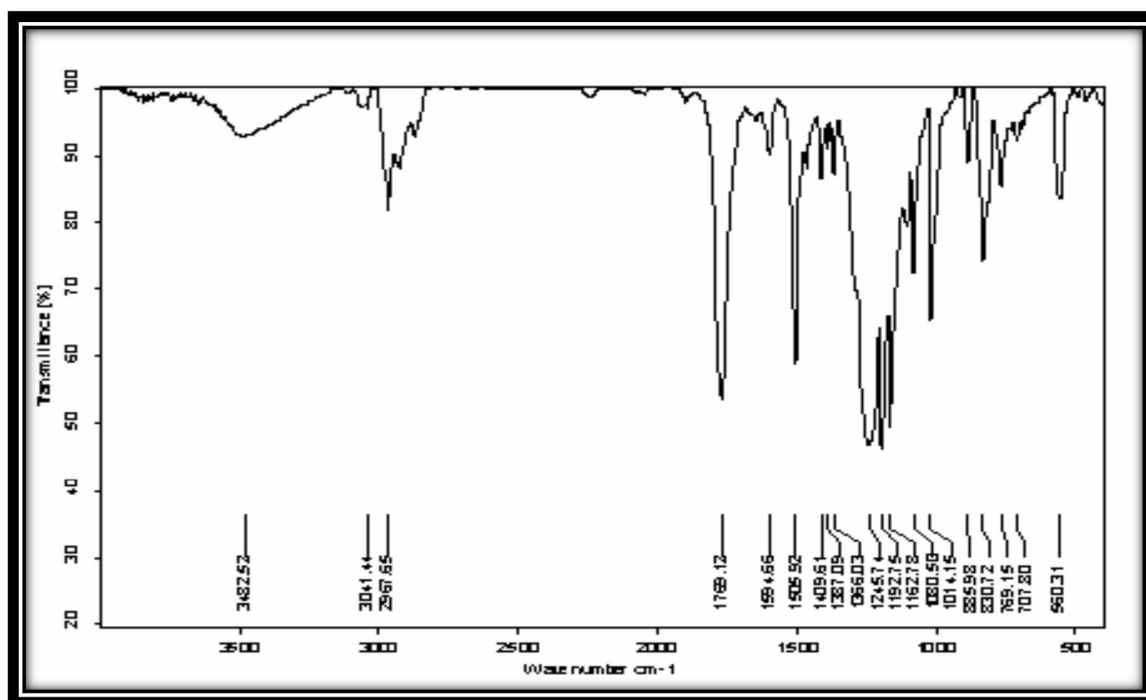


Figura 27. IR PC SADTLER.

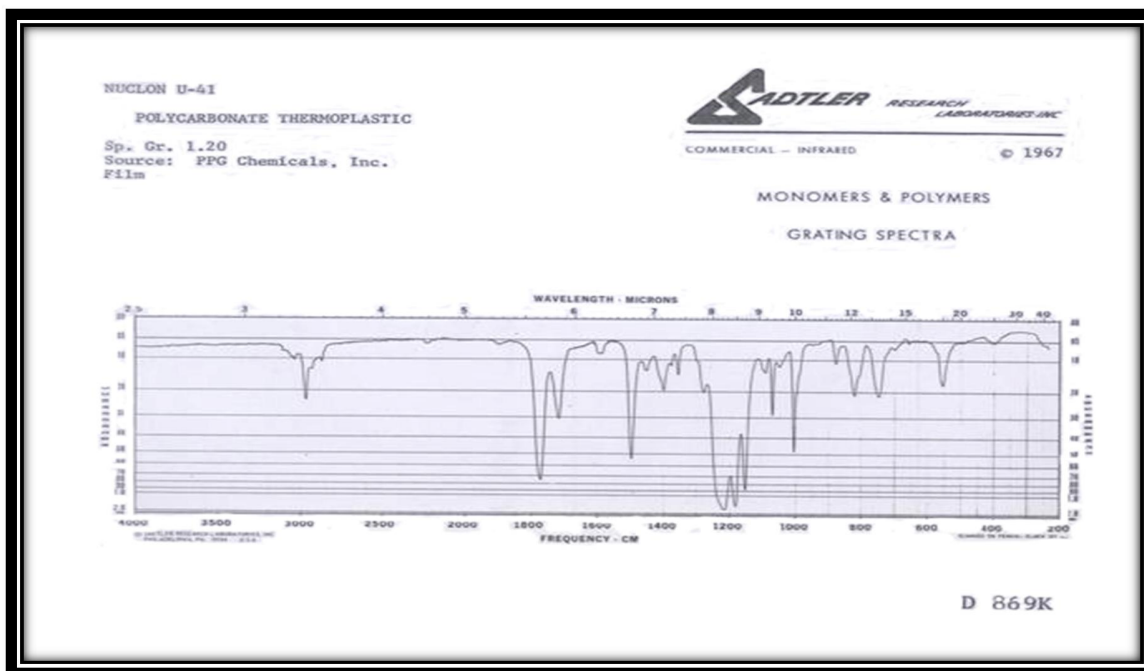


Tabla 2. Señales de espectroscopia IR para el policarbonato.

BANDA	LONGITUD DE ONDA (cm ⁻¹)
Flexión CH en aromáticos disustituidos; sustitución 1,4	830,34
Tensión C-O-Ar	1079,70
Tensión C-O en ésteres (dos bandas)	1192,50 y 1161,96
Tensión C-O	1231,38
Flexión CH en CH ₃	1366,31
Tensión C=O	1768,82
Alargamiento CH en CH ₃	2967,96

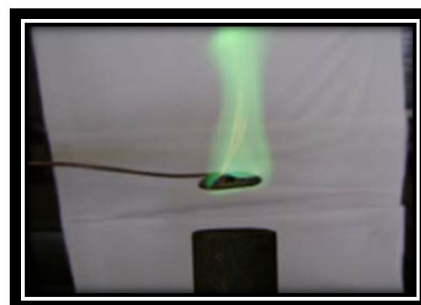
3.1.2 Prueba de Beilstein. Al colocar el polímero en el alambre y someterlo a calentamiento directamente en la llama, este inicialmente se deformó lo que significa que tiene un comportamiento característico de un polímero termoplástico; la llama fue incandescente, brillante y de gran tamaño, no se auto extinguió, no presentó exceso de humo, su color fue amarillo intenso, no se evidenció la presencia de halógenos en la muestra, ya que se utilizó como patrón de referencia el color verde de la llama del PVC, indicando la presencia de cloro cuando este hace combustión. Pues durante la combustión reacciona con el cobre para formar haluros volátiles que dan color a la llama [16].

Con esta prueba se concluye que el polímero es bastante inflamable, tiene un alto contenido de carbono, es termoplástico y no tiene compuestos halogenados. (Véase **Figura 28**)

Figura 28. Llama del PC (a) y Llama del PVC (b).



(a)



(b)

3.1.3 Pruebas de solubilidad. Se considera solubilidad parcial cuando el disolvente penetra en el material produciendo un hinchamiento sin llegar a disolverlo. Esto se debe a que la disolución de un polímero es un proceso lento que ocurre en dos etapas. En la primera las moléculas del disolvente se difunden lentamente dentro del polímero produciendo un hinchamiento del mismo. El proceso de disolución puede detenerse en esta fase, si las fuerzas

intermoleculares polímero-polímero son lo suficientemente grandes como para impedirlo. En el caso de que estas fuerzas puedan superarse por las interacciones intensas polímero-disolvente, tendrá lugar la segunda etapa de la disolución. En esta, el polímero hinchado se desintegra gradualmente convirtiéndose en una verdadera disolución.

Teniendo en cuenta que el policarbonato es un poliéster, por tanto un polímero de condensación, sus cadenas poliméricas se unen entre sí por fuerzas de atracción tipo dipolo-dipolo, lo cual hace que las interacciones con la mayoría de solventes (acetona, ácido acético, tetracloruro de carbono, estireno, tolueno y xileno) se detengan en la primera fase.

Tabla 3. Pruebas de solubilidad del PC-Postconsumo.

SOLVENTE	COMPORTAMIENTO
Acetona comercial	Parcialmente soluble
Ácido acético glacial	Parcialmente soluble
Estireno	Parcialmente soluble
Benceno	Parcialmente soluble
Cloroformo	Soluble
Diclorometano	Soluble
Etanol comercial	Insoluble
Fenol	Soluble
Formaldehído al 37%	Insoluble
Tetracloruro de carbono	Parcialmente soluble
Tolueno	Parcialmente soluble
Xileno	Parcialmente soluble

La solubilidad del policarbonato en solventes clorados se debe a que es un aceptor de protones débil, por lo tanto se disuelve en dadores de protones, como el cloruro de metilo, puesto que la interacción específica vencerá la barrera de energía libre que restringe la solución de polímeros cristalinos [21].

3.1.4 Test de pirólisis. Luego de realizar la pirolisis del PC, mediante el ensayo descrito en el numeral (2.2.4), el vapor producido en la descomposición de dicho polímero al entrar en contacto con la cinta de papel pH, arrojó un valor de 5. Resultado que ratifica que el polímero del cual están elaborados los discos compactos es policarbonato [16].

Figura 29. Pirólisis del PC.



3.1.5 Punto de fusión. Se colocó en el fusiómetro una pequeña cantidad de policarbonato, se registró la temperatura en la que el material empezó a fundirse y la temperatura en la cual se fundió completamente (Véase **Tabla 4**).

Tabla 4. Punto de Fusión del PC.

MUESTRA	RANGO DE FUSIÓN (°C)
PC-1	243-247
PC-2	245-248
PC-3	243-246

Al estudiar el comportamiento del PC con el aumento de temperatura, se pudo confirmar que su temperatura de transición vítrea (T_g) se encontraba en el rango entre 135°C y 155°C [22], ya que en este rango el polímero experimenta un ablandamiento como consecuencia del movimiento coordinado de sus moléculas, por acción de la energía cinética que adquieren por absorción de energía térmica. También se determinó el rango de temperatura de fusión para el PC, el cual fue entre 244°C y 247°C (Véase **Tabla 4**), similar al rango reportado en la literatura [21] el cual es $245\text{-}250^{\circ}\text{C}$. Se confirmó que el PC es un polímero termoplástico, pues luego de ser sometido a un calentamiento superior a la temperatura de transición vítrea, vuelve a solidificar a temperatura ambiente.

3.1.6 Densidad aparente.

Tabla 5. Densidad del PC.

Muestra	Peso del PC [g]	Volumen Desplazado (mL)	Densidad (g/mL)
PC-1	1.17	1.0	1.17
PC-2	1.77	1.5	1.18
PC-3	2.38	2.0	1.19
Promedio	1.77	1.5	1.18

La densidad calculada, empleando la fórmula descrita en la sección 2.2.6 para el policarbonato fue de 1,18g/mL (Véase **Tabla 5**). Este dato se obtuvo a una temperatura de 25°C y concuerda con el dato reportado por la literatura para el policarbonato cuyo valor es de 1.2g/mL [22].

3.2 REUTILIZACIÓN DEL PC POST-CONSUMO

3.2.1 Determinación del límite de dispersión del PC Post- Consumo en estireno.

Tabla 6. Límite de dispersión del PC-Post-consumo.

Muestras	Peso Dispersión Inicial (Pi) [g]	Peso Dispersión Final (Pf) [g]	Diferencia (Pi-Pf) [g]
1	4.899	4.498	0.361
2	4.891	4.492	0.399
3	4.889	4.499	0.390
Promedio	4.893	4.496	0.383

Después de realizado el procedimiento descrito en el numeral 2.3.2, se encontró que el límite de dispersión del policarbonato post-consumo en estireno fue de 0.383g/mL.

3.2.2 Ensayo de compatibilidad entre la RPP y la dispersión PC-Estireno.

Tabla 7.Compatibilidad entre la RPP y la dispersión PC-Estireno.

Muestra	Dispersión PC – Es [g]	RPP [g]	Dispersión PC – Es % P/P	RPP % P/P
1	0.5	4.5	10	90
2	1.0	4.0	20	80
3	1.5	3.5	30	70
4	1.75	3.25	35	65
5	2.0	3.0	40	60
6	2.5	2.5	50	50
7	3	2	60	40

En la **Tabla 7** se aprecia las diferentes cantidades tomadas tanto de la Dispersión como de la RPP; Se pudo observar que al aumentar poco a poco el %P/P de PC-Es en la mezcla, aumentaba a su vez el tiempo de polimerización, punto negativo ya que la idea es encontrar una relación en la que el tiempo de polimerización no sea demasiado largo si se piensa llevar a escala industrial; Además también se pudo observar que dichas muestras presentaron fallas estructurales, se rompían con facilidad al aplicarle pequeñas fuerzas razón por la cual se descartaron las muestras No 6 y 7 (Véase **ANEXO B**).

En las muestras 1, 2, 3 y 4, se observó uniformidad en la mezcla, el tiempo de polimerización fue menor, las características físicas de cada una de ellas fueron buenas, pero son muestras que tienen una cantidad de Dispersión PC-Es baja, por lo que se incrementarían los costos del proceso al tener que usar una mayor cantidad de RPP, y no se estaría cumpliendo con el objetivo de reciclar eficientemente el PC ya que se estaría incorporando poca cantidad de dicho polímero en la mezcla.

Por esta razón se eligió como matriz polimérica a la muestra **5** (Véase **Tabla 8**), ya que ésta presenta buenas propiedades físicas, su tiempo de polimerización es aceptable, se observa la presencia de una sola fase, y lo más importante es que presenta la mayor cantidad posible de Dispersión PC-Es sin verse afectada la estructura de la muestra (Véase **ANEXO B**).

Tabla 8. Formulación de la matriz polimérica.

Componente	% P/P
Dispersión PC-Es	40
RPP	60

3.2.3 Fabricación de aglomerados reforzados con cascarilla de arroz

Tabla 9. Parámetros utilizados en la fabricación de los aglomerados.

# muestra	Cascarilla Molida (CM) % P/P	Matriz Polimérica % P/P	Presión [ton]	Tiempo [min]
1	30	70	1	20
2	35	65	1	20
3	40	60	1	20
4	45	55	1	20
5	50	50	1	20
6	60	40	1	20
7	70	30	1	20

En la **Tabla 9** se presentan las proporciones utilizadas en la elaboración de los aglomerados.

Las muestras 6 y 7 por tener un bajo porcentaje de matriz polimérica manifestaron una nula adherencia entre las fibras, ya que el exceso de fibras de CM en la mezcla, hace que la matriz polimérica no las logre inundar completamente, quedando fibras sueltas que llevaron a la rotura inmediata de estos ensayos. Hecho contrario se observó en las muestras 1 a 5 donde la compactación fue buena obteniendo un material rígido con un muy bajo nivel de agrietamiento; pero presentándose en las muestras 1 y 2 gran exudación de matriz polimérica al ser prensadas, lo que conllevó a la pérdida o desperdicio de este material; Sin embargo, con las muestras 3, 4 y 5 se obtuvieron aglomerados casi con las mismas características físicas que las muestras 1 y 2, sino que estas mezclas presentaron un grado de exudación menor de matriz polimérica que las muestras anteriores, es decir, hubo una pérdida o desperdicio menor de matriz polimérica, obteniéndose de esta manera aglomerados con un mejor aspecto físico y estructural comparados con los aglomerados fabricados con las otras muestras.

Se tuvieron en cuenta varios parámetros para la elección de las muestras con las cuales se iría a trabajar, estas fueron: 1. Grado de Compactación: Las muestras elegidas mostraron un grado alto de adherencia entre sus partículas; 2. Rigidez: La estructura de las probetas reflejó un comportamiento duro y resistente; 3. Nivel de agrietamiento: Las muestras seleccionadas correspondieron a aquellas con un nivel nulo o bajo de grietas en su configuración, y de esta forma no se vieron afectadas las propiedades mecánicas del aglomerado. Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, las muestras que se eligieron para la fabricación y posterior caracterización de los aglomerados fueron las muestras 3, 4 y 5. (Véase **Anexo C**).

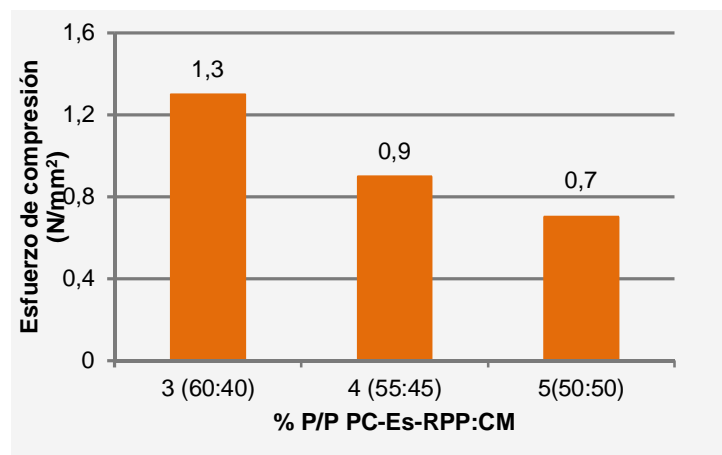
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS

3.3.1 Ensayo de compresión.

Tabla 10. Resultados del ensayo de compresión.

Muestra (Matriz Polimérica:CM)	Área (m ²)	Fuerza (kN)	Esfuerzo de Compresión $\sigma = F/A$ (kN/m ²)	Esfuerzo de Compresión $\sigma = F/A$ (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (Mpa)
3 (60:40)	0.0049	6.5	1326.5	1.33	63.34
4 (55:45)	0.0053	5	943.40	0.94	43.03
5 (50:50)	0.0055	4	727.27	0.73	34.08

Figura 30. Resultados del ensayo de compresión.



En la **Tabla 10** y **Figura 30** se presentan los resultados del ensayo de compresión de las muestras 3,4 y 5, en ellas se pueden apreciar claramente que a medida que aumenta la cantidad de matriz polimérica a su vez aumenta tanto el esfuerzo de compresión como el módulo de elasticidad; Dicho módulo representa la rigidez de

un material, es decir, entre mayor sea el módulo de elasticidad a su vez será más rígido el material.

La posible razón de que las muestras 4 y 5 presenten un menor rendimiento en este ensayo, puede ser debido a los espacios que se forman entre la matriz polimérica y la cascarilla molida del aglomerado, que son más grandes comparados con la muestra 3, ya que al tener menos cantidad de matriz polimérica menor será el grado de compactación, originando de esta manera fallas estructurales que permiten al aglomerado alcanzar más rápidamente su punto de fractura con la aplicación de una fuerza.

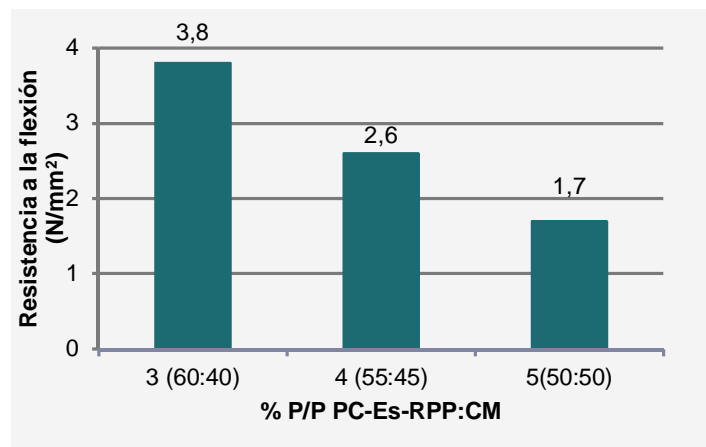
3.3.2 Ensayo de flexión. En la **Figura 31 (a) y (b)** se observa que a medida que disminuye el contenido de cascarilla molida en el material aglomerado éste incrementa su resistencia a la flexión;

Tabla 11. Resultado del ensayo de flexión.

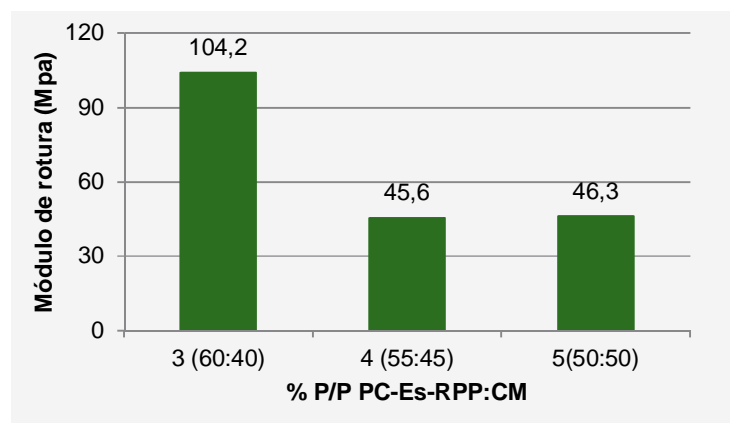
Muestra	Longitud de la muestra (mm)	l=Longitud entre los soportes	b=Ancho de la muestra (mm)	h=Espesor de la muestra (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (N)	Resistencia a la flexión $\sigma = (3Fl)/(2bh^2)$ (N/mm ²)	Módulo de rotura $= L^3 \cdot F / (4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \sigma)$ (MPa)
3	150	100	40	10	400	100	3.8	104.17
4	150	100	40	19	760	250	2.6	45.56
5	147	100	40	10	640	100	1.7	46.29

Figura 31. Resultados del ensayo de flexión.

(a)



(b)



Los mejores resultados para la resistencia a la flexión y el módulo de rotura fueron los obtenidos en la muestra con un contenido del 40% de cascarilla de arroz; por encima de este porcentaje se nota claramente que tanto la resistencia a la flexión como el módulo de rotura tienden a disminuir. Comparando el módulo de rotura de las muestras con las exigencias para aglomerados comerciales, se puede concluir que las probetas ensayadas mostraron un comportamiento bastante similar y

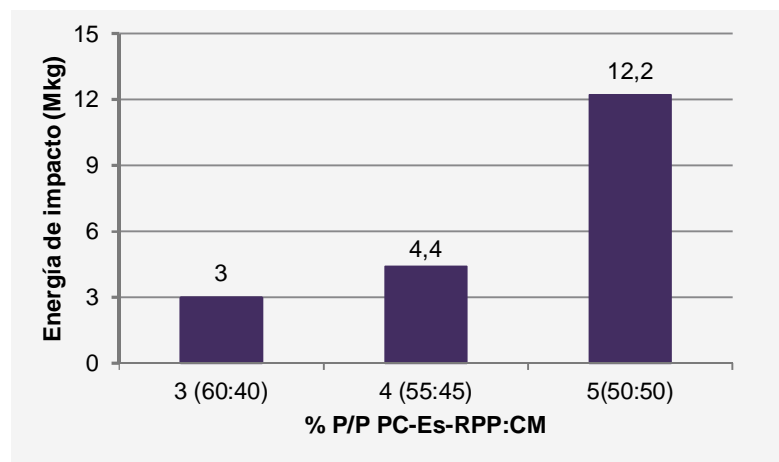
superior a éstas, siendo materiales compuestos que comercialmente pueden competir en el mercado actual.

3.3.3 Ensayo de impacto.

Tabla 12. Resultados del ensayo de impacto.

Muestra	Energía de Impacto (MKg)	Angulo de Impacto (°)	Esfuerzo de Impacto (MKg/cm ²)	Altura de caída (cm)
3	3	16.8	3.608	14.285
4	4.375	23	5.209	20.846
5	12.250	53	14.957	59.203

Figura 32. Resultados del ensayo de impacto.



La idea principal de este ensayo era medir la energía absorbida por el material aglomerado al ser golpeado por el péndulo del equipo. Se pudo observar un

decaimiento en la capacidad del aglomerado de absorber energía a medida que se aumentaba la cantidad de matriz polimérica (Véase **Tabla 12**).

Al comparar los resultados de las tres muestras se puede ver claramente que la muestra número 3 presenta menor energía de impacto que las otras dos, esto es debido a que al haber menor cantidad de cascarilla presente en la muestra 3 se necesitará de menos energía para quebrantar el aglomerado; a su vez al comparar este resultado con resultados reportados [23] se encuentra que los resultados no son los mejores, pero hay que tener presente que la fibra cambia la constitución del material, por lo que un material totalmente sólido (una fase) absorberá más energía que un material compuesto por varias sustancias. La disminución de la energía de impacto va acompañada de un aumento de la rigidez, y puesto que para aplicaciones industriales es necesario que este tipo de materiales tenga un comportamiento rígido en esta prueba se eligió la muestra 3, ya que exhibe una menor cantidad de energía de impacto y por tanto una mayor rigidez en su estructura.

La diferencia en las propiedades mecánicas puede estar asociada con que en el proceso de polimerización, las moléculas provenientes del PC post consumo pese a quedar muy próximas a los reticulados de la resina polimerizada, no se unieron químicamente, estableciéndose en la estructura final como cadenas ramificadas que aunque quedaron ocluidas conllevaban a la disminución de las propiedades mecánicas en los aglomerados 4 y 5.

3.3.4 Pruebas de resistencia química. En la **Tabla 13** se presentan los resultados obtenidos después de haber sido sometidos los aglomerados a las pruebas de resistencia química.

Tabla 13. Resultados de pruebas de resistencia química.

Muestra	Ácido Sulfúrico	Hidróxido de Sodio
3	No presentó disgregación de material. No hubo cambio de color	Disgregación mínima de material Cambio mínimo de color
4	No presentó disgregación de material. No hubo cambio de color	Disgregación parcial del material. Cambio parcial en sus propiedades físicas.
5	No presentó disgregación de material. No hubo cambio de color	Disgregación elevada de material Cambio notable de color

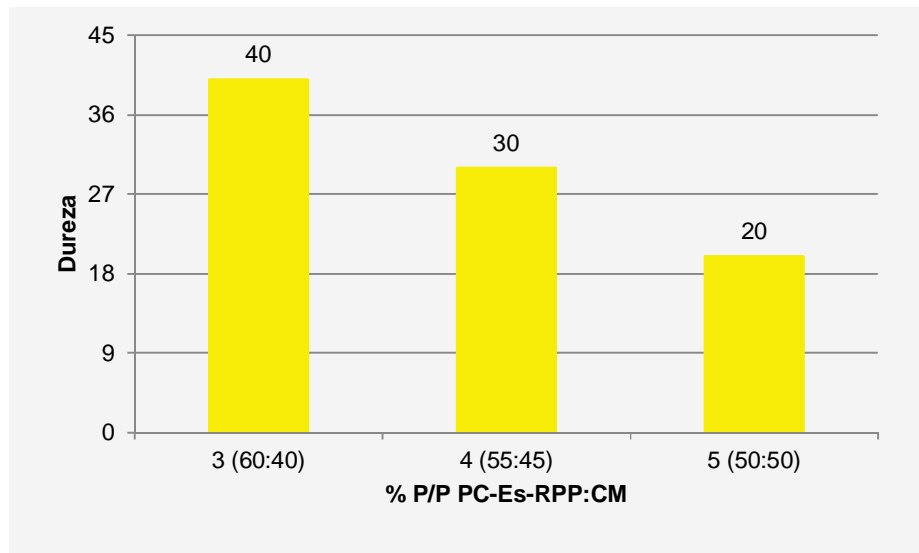
La lignina y la celulosa componentes principales de la cascarilla de arroz al estar sometidas al medio ácido exhiben gran resistencia en su estructura química que se ve reflejada en su apariencia, hecho que es evidente en la no variación de cambios físicos y químicos en la estructura de cada una de las muestras sin importar el tiempo de exposición, además el agente aglomerante también exhibe una gran resistencia a este tipo de ácido. Hecho contrario ocurre cuando el aglomerado es sometido al ataque por una base, en este caso el hidróxido de sodio (Véase **ANEXO D**), ya que a pesar que el PC presenta entre sus propiedades químicas gran resistencia a las bases fuertes, es evidente la degradación de la celulosa por parte de las soluciones alcalinas, este ataque incluye no solo la ruptura de la estructura supra molecular sino que ocurre el hinchamiento e inserción de los grupos químicos de la solución los cuales rompen los enlaces intermoleculares y solvatan las moléculas simples siendo el cambio más notorio en la muestra 5.

3.3.5 Ensayo de dureza. Para este ensayo se empleó un durómetro Shore D, con el objeto de evaluar la resistencia que oponían los aglomerados al ser penetrados por otro material más duro. (Véase **ANEXO D**) Los resultados correspondientes se muestran en la **Tabla 14**.

Tabla 14.Ensayo de dureza.

Muestra	Dureza (0-100 u.shore)
3	40
4	25
5	20

Figura 33. Ensayo de dureza.



Para el caso, como el durómetro toma una escala desde 1 hasta 100 Shore D, es notorio que los tres aglomerados presentan dureza intermedia, observándose una diferencia considerable entre las tres muestras, sin embargo todos los valores son

importantes considerando que esta propiedad relaciona los materiales con el acabado superficial que han de tener al momento de ser sometidos al mecanizado, puesto que, la dureza de los materiales no debe ser ni muy alta porque existe la posibilidad de que se presenten despiques, ni muy baja porque el material puede deformarse, para este caso la muestra que presenta las características idóneas es la muestra número 3.

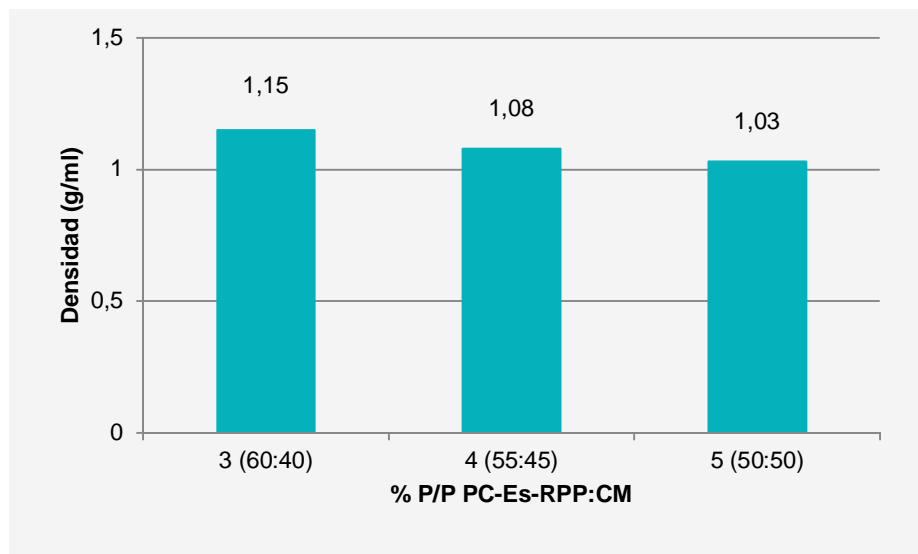
A manera de comparación se tomaron dos muestras de materiales conocidos como lo son las maderas conocidos con el nombre de tríplex y sapán y se les determinó experimentalmente su dureza (Véase **ANEXO D**). Comparando los resultados de las muestras comerciales con los resultados de los aglomerados desarrollados, se puede aseverar que los aglomerados obtenidos presentan resultados iguales y superiores que los materiales comerciales; esto demuestra la utilidad de la cascarilla de arroz, la resina poliéster y el PC post-consumo, para obtener productos materiales competitivos, similares a los productos comerciales existentes. Inclusive, se puede pensar que su fabricación a escalas mayores sería una opción acertada de cara a la obtención de aglomerados más amigables con el medio ambiente.

3.3.6 Determinación de la densidad aparente.

Tabla 15. Determinación de la densidad aparente.

Muestra	Masa (g)	Volumen Desplazado (mL)	Densidad (g/mL)
3	11.7	10.2	1.15
4	10.8	10	1.08
5	10.3	10	1.03

Figura 34. Determinación de la densidad aparente.



La **Tabla 15** y **Figura 34** muestran que la cantidad de PC-Es-RPP es directamente proporcional a la densidad, pues hay un mejor empaquetamiento de las fibras de CM lo que disminuye los espacios vacíos de la probeta aumentando así su densidad caso contrario ocurre con el contenido de CM ya que presenta un comportamiento inversamente proporcional respecto a la densidad, por lo que cuando hay un mayor contenido de CM disminuye el contenido de PC-Es-RPP habiendo de esta manera una menor humectabilidad de las fibras aumentando los espacios vacíos con lo que la densidad disminuye.

Una característica esencial de los aglomerados es que tengan una baja densidad, así se permite diseñar posteriormente piezas ligeras, de buena rigidez para que incluso su transporte se haga más sencillo [24].

Se observa que los aglomerados presentan una densidad relativamente cercana a la del agua, por ende se pueden catalogar como buenos productos en términos de la densidad, ya que tienen una característica propia de los buenos materiales agregados.

3.3.7 Test de llama. En las muestras se observó que la llama de combustión del material no se auto-extingue fácilmente a mayor contenido de PC-Es-RPP en el aglomerado; en todas las muestras no se generan residuos ni sólidos de combustión, la llama generada es fuliginosa y de un color amarillo intenso esto es propio de materiales termoplásticos. La llama es auto-extinguible, por el hecho de que la cascarilla de arroz presenta un comportamiento ignífugo, es decir que no inicia fácilmente la combustión y no produce llama mientras se quema, esto hizo que se presentara una difícil combustión continua y completa; durante el proceso de combustión se produce gran cantidad de humo, con desprendimiento de gases y olores penetrantes esto debido a la presencia de sustancias volátiles como el estireno. La cantidad de humo producida es proporcional a la cantidad de resina presente en el aglomerado. (Véase **ANEXO D**)

3.4 FORMULACIÓN FINAL DEL AGLOMERADO

Los resultados anteriores hacen suponer que los materiales aglomerados obtenidos como resultado de esta experimentación preliminar, alcanzan su máximo en cuanto a propiedades mecánicas como se observó en los resultados obtenidos en los ensayos de compresión, flexión e impacto, cuando el contenido de fibra natural es de 40% en peso, es decir la muestra 3. Para contenidos superiores se notó una clara disminución en las propiedades mecánicas, es decir esto hace a los aglomerados más frágiles y quebradizos. En cuanto a la densidad se refiere, presenta un valor relativamente alto con respecto a las otras dos muestras; en relación con la prueba de resistencia química se notó que ésta sufrió un ataque químico mínimo pero no total, aunque para el tipo de uso que se especifique o que se requiera, este ensayo es relevante ya que permite determinar el comportamiento del material en presencia de estos agentes.

De esta manera se puede concluir que la formulación o relación que produce materiales aglomerados con características idóneas en caso de ser utilizadas a nivel industrial es la formulación presente en la muestra número 3.

Tabla 16.Formulación final del aglomerado.

Componente	% P/P
PC-Es-RPP	60
Cascarilla Molida (CM)	40

3.4.1 Comparación de propiedades entre los aglomerados.

Tabla 17.Comparación entre aglomerados fabricados con la matriz polimérica compuesta por PC-Es-RPP y aglomerados fabricados con sólo RPP.

Muestra	Esfuerzo de Compresión (N/mm²)	Resistencia a la flexión (N/mm²)	Energía de Impacto (MKg)	Dureza
PC-Es-RPP:CM 60:40	1.3	3.8	3	40
RPP:CM 60:40	1.7	4.3	3.3	45

Al comparar los resultados obtenidos al someter tanto el aglomerado escogido fabricado con PC-Es-RPP con los resultados del aglomerado fabricado con solo RPP a distintas pruebas (Véase **Tabla17**), se puede observar que en cada una de

ellas la diferencia es muy pequeña, obteniéndose de esta manera un punto a favor de los aglomerados fabricados con PC-Es-RPP, ya que si bien en cada una de las pruebas dichos aglomerados presentan un rendimiento menor que los fabricados con sólo RPP, si se mira desde un punto de vista económico, los aglomerados fabricados con PC-Es-RPP tendrían un costo mucho menor ya que se está reemplazando parte de la resina poliéster por un polímero post-consumo el cual se adquiere a un bajo costo; El hecho que los aglomerados fabricados con sólo RPP presenten mejores propiedades es debido a que la resina poliéster permite que el aglomerado se obtenga de una forma más compacta, es decir, el grado de adherencia entre la resina poliéster y la cascarilla molida es mayor, originando mejores resultados. Si se mira la relación costo- beneficio, sería mejor la utilización de los aglomerados fabricados con PC-Es-RPP, ya que la diferencia en cuanto a sus propiedades no es muy grande (Véase **Tabla 17**), pero la diferencia económica entre uno y otro si es considerable, ya que se está reemplazando un 40% de resina poliéster por un material recuperado como lo es el policarbonato obtenido de discos compactos.

CONCLUSIONES

De acuerdo con las pruebas de caracterización y análisis espectroscópico realizado, se logró identificar plenamente que el material polimérico del cual están fabricados los discos compactos es policarbonato.

Se determinó que las mejores condiciones para la elaboración del aglomerado consistió en una mezcla entre la cascarilla de arroz molida y la dispersión PC-Es-RPP con porcentajes de 40% y 60% respectivamente; ya que presenta las mejores propiedades físico-mecánicas, con una resistencia parcial a los agentes químicos y buen grado de dureza, que permite considerarlos como materiales útiles en aplicaciones diversas.

Se fabricaron materiales dúctiles, porque se deformaron plásticamente antes de romperse; duros ya que se opusieron a ser penetrados, hendidos o rayados; poco flexibles puesto que presentaron poca posibilidad de sufrir deformaciones elásticas, y materiales con la posibilidad de fallar por deformación o por ruptura dependiendo de las condiciones a las que esté sometido.

Mediante la incorporación del PC post-consumo en la fabricación de aglomerados de cascarilla de arroz se reutilizan y se reincorporan al ciclo de vida útil los residuos de PC provenientes de los discos compactos que se desechan, aplicándose así una vía de reciclaje de polímeros post-consumo.

Utilizando material polimérico post-consumo, que tiene poco costo monetario y es de fácil adquisición, se consiguen elaborar productos de características similares a los que se fabrican con materiales poliméricos convencionales (aglomerados comerciales), estos factores le incrementan al material de desecho el valor

agregado, se le retorna al ciclo de vida útil y se contribuye a la disminución de su acumulación en el medio.

El hecho de poder sustituir cerca de un 40% de la resina poliéster por un material post-consumo en la fabricación de aglomerados, puede reducir de manera significativa los costos de elaboración de estos nuevos materiales, para generarse entonces, productos con suficiente dureza, resistencia a la compresibilidad y límite de flexibilidad empleándose en gran parte sólo material de desecho.

La cascarilla de arroz tiene un gran potencial para convertirse en un material de carga de origen natural de un material compuesto. Constituyéndose esto en una nueva alternativa que amplía su campo de aplicación, le da valor adicional y se establece como una posible solución frente al problema de su adecuada disposición; aprovechando que es un subproducto de bajo costo, baja densidad, resistencia aceptable, fácil obtención, biodegradable y proveniente de fuentes renovables.

Con este tipo de materiales la industria puede tomar un mayor auge, siendo sus aplicaciones muy diversas de acuerdo a las características y propiedades mecánicas que presentan. Es de gran importancia este tipo de innovación puesto que se trata de materiales de desecho, que se convertirán en productos elaborados con un alto valor agregado. Esto es un ejemplo claro de que se puede aprovechar los materiales que otros desechan para crear nuevos materiales con múltiples aplicaciones.

RECOMENDACIONES

Efectuar ensayos para la fabricación de aglomerados, empleando otros tamaños de partícula en la carga y otros polímeros post-consumo, pues esto influiría directamente sobre la densidad, dureza y otras propiedades mecánicas de los materiales.

Evaluar las propiedades de aglomerados fabricados utilizando solamente la dispersión PC-Es, para establecer la posibilidad de ahorrarse el empleo de la resina poliéster comercial, siempre y cuando dicha metodología genere materiales aglomerados con buenas propiedades mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] KAHL, R. 1964. Cuatro años de experiencias con policarbonato. Revista de plásticos modernos. (94). 245-255.

[2] KIRCHER, K. 1985. Policarbonato protegido contra el fuego. Revista de plásticos modernos. (352). 459-466.

[3] MAGRUGA, E. L. 1995. Que es un polímero. Revista de plásticos modernos. (466). 319-324.

[4] ARENAS, H. Polímeros. Ediciones UIS. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. 1999. 13-19.

[5] BARÓN, W. y PALACIOS, J. Obtención de productos a partir del PET reciclado obtenido de los residuos sólidos urbanos domésticos de Bucaramanga. 2002. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. 1-7.

[6] SERRANO, D.P. y AGUADO, J. 2001. Reciclado químico de plásticos. Revista de plásticos modernos. 82 (542). 155-160.

[7] BAYER, A.G. 2010. Breve historia del descubrimiento del policarbonato. Revista de plásticos modernos. 87 (574). 314-319.

[8] GARZÓN, R. 1974. Materiales técnicos: Policarbonato. Revista de plásticos modernos. (267). 371-374.

- [9] DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE POLÍMEROS. Polycarbonates [on line]. Universidad del sur de Mississippi. 1995, 1996. Disponible en:
<<http://www.psrc.usm.edu/macrog/pc.htm>>.
- [10] KAHL, R. 1964. Cuatro años de experiencias con policarbonato. Revista de plásticos modernos. (94). 245-255.
- [11] BAYER, A.G. 2002. Makroform: Planchas de policarbonato y poliéster. Revista de plásticos modernos. 83 (551). 448-458.
- [12] SALGADO, C. Permanencia en CD-R (discos compactos gravables) [on line]. México 2001. Disponible en:
<<http://www.lmi.com.mx/revista/conservacion/16.html>>.
- [13] VARÓN. Camargo. Javier y RESTREPO. Álvaro. Hernán. Caracterización térmica y estequiométrica de la combustión de la cascarilla de arroz. Grupo de investigación de termofluidos. Facultad de Ingeniería Mecánica. Corporación universitaria de Ibagué. Scientia et technica. Mayo 2004.
- [14] BULA. Silvera. Antonio. José y CADENA. Carolina. Giovanna. Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales. Departamento de Ingeniería Mecánica. Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte. 2002. Pág. 2.
<<http://www.uninorte.edu.co/publicaciones/upload/File/ingenieria_n12.pdf>>
- [15] XAVIER, Juan. Estudio de la eficiencia de sistemas químicos de iniciación del curado de resinas de poliéster insaturado. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 1993.p.25-26. 6 Julio 2011.
<<http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6686/06Txrj6de14.pdf?sequence=6>>

[16] DIETRICH BRAUN, Simple Methods for identification of plastic, Macmillan Publishing co, new Cork 1982

[17] http://www.ticona.com/index/products/liquid_crystal.htm(acceso marzo 3 - 2012)

[18] GONZALEZ, Lina Juliana y GONZALEZ, Claudia Irene. Aprovechamiento y reutilización de abs post-consumo en la fabricación de aglomerados usando como carga cascarilla de arroz. Trabajo de grado Ingenieras Químicas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química

[19] LÓPEZ, Laura Viviana. Fabricación de aglomerados de cascarilla de arroz y poliestireno post-consumo. Trabajo de grado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Química

[20] OWEN, Johansson. Reutilización de acrilonitrilobutil estireno (abs) postconsumo. Trabajo de grado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Química

[21] SANCHEZ Johan. Comportamiento termico y mecánico del polietilen tereftalato (PET) modificado con resinas polimericas basadas en Bisfenol-A. 2003. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 17-19, 71-80.

[22] RAIMOND B. SEYMOUR. Introducción a la química de los polímeros. Segunda edición. Editorial reverté

[23] CERVANTES, Luis, ORTEGA, Alberto y GARZ Rolando. Compósitos de Madera Plástica. 5 dic. 2010. p 11-15. <<http://rolandog.com/wpcontent/uploads/2006/12/reporte.pdf>>

[24] ASTM D 792-00. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.

ANEXOS

ANEXO A. NORMAS TÉCNICAS

ENSAYO DE COMPRESIÓN

NORMA D-695

SIGNIFICADO Y USO

Las pruebas de compresión proporcionan información sobre las propiedades de compresión de plástico, cuando se utilicen en condiciones semejantes a aquellas en las que se realizan las pruebas.

Propiedades de compresión incluyen módulo de elasticidad, límite de elasticidad, la deformación más allá de un límite de elasticidad, y resistencia a la compresión (a menos que el material se aplane, pero no de fracturas). Materiales que poseen un bajo nivel de ductilidad, no pueden presentar un límite de elasticidad. En caso de un material que falla en la compresión por una fractura de rotura, la resistencia a la compresión tiene un valor muy definido.

En el caso de un material que no falla en la compresión de una fractura de rotura, la resistencia a la compresión es arbitraria, dependiendo del grado de distorsión que se considera como un indicador de falla total del material.

Las pruebas de compresión proporcionan un método estándar de obtención de datos para la investigación y desarrollo, control de calidad, aceptación o de rechazo en virtud del pliego de condiciones, y con fines especiales. Las pruebas no se pueden considerar significativas para el diseño de la ingeniería en usos que se diferencien extensamente de la escala de carga-tiempo de la prueba estándar.

Estas aplicaciones requieren pruebas adicionales, tales como el impacto, la fluencia y la fatiga.

ÁMBITO

Este método de ensayo cubre la determinación de las propiedades mecánicas de plásticos rígidos reforzados y no reforzados incluidos los compuestos de alto módulo, cuando se cargan en compresión a tasas uniformes bajo esfuerzo o carga.

PROCEDIMIENTO

Las Probetas que se emplean en el ensayo estándar pueden ser sometidas hasta una carga de 41.370 MPa (6,000,000 psi). Los valores indicados se dan en unidades del Sistema Internacional las dimensiones de las probetas a fallar deben estar sometidas a las especificaciones del equipo a utilizar para esta prueba, la geometría de cada una de las muestras es cilíndrica.

ENSAYO DE FLEXION NORMA D-790.

Este método cubre la determinación de las características del ensayo de flexión de plásticos reforzados y no reforzados, incluyendo los compuestos de alto módulo y materiales de aislamiento eléctrico. Para esta prueba Las probetas usadas son de forma de barra rectangular.

El método para esta prueba es aplicable generalmente a materiales rígidos y semirrígidos. Sin embargo la fuerza a flexión no se puede determinar para

materiales que no se rompan o que no fallen en la superficie externa del espécimen dentro del 5% del límite de la tensión.

Este método utiliza un sistema en el que hay dos apoyos y una carga aplicada a una viga. Los valores indicados para esta prueba se dan en unidades del sistema internacional. Esta norma no pretende tratar las condiciones de seguridad asociadas a su uso. Es la responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadas de seguridad y de salud y determinar la aplicabilidad de limitaciones reguladoras para su uso.

RESUMEN DE LA PRUEBA

La sección transversal de una barra de geometría rectangular es puesta sobre dos apoyos y es sometida a una carga colocada a mitad de la distancia entre los apoyos hasta que el espécimen experimente rotura en la superficie externa en este punto se dice que la tensión es máxima. Las dimensiones de las muestras usadas en el ensayo dependen de las limitaciones y el criterio de la máquina utilizada para tal fin.

SIGNIFICANCIA Y USO

Las características de flexión determinadas por este método son útiles especialmente para los propósitos y especificaciones de control de calidad. Los materiales que no fallan por la tensión máxima permitida bajo estos métodos se tiene que realizar la prueba de la curva. La diferencia básica entre estos dos métodos está en la localización del momento de flexión máximo y de las tensiones axiales máximas de la fibra.

CONDICIONAMIENTO

Se condicionan los especímenes a fallar a una temperatura de $\pm 23 \pm 2^\circ\text{C}$ y 50.5 % de humedad relativa.

PROCEDIMIENTO

Medir la anchura y profundidad del espécimen a fallar, así como las distancias de a los extremos de sus apoyos y la distancia entre los apoyos, estas medidas son importantes ya que permiten realizar cálculos matemáticos que conducirán a la medida de la resistencia a la flexión. Alinear la carga justo en la mitad de los apoyos, los apoyos deben estar paralelos entre sí, lo cual se puede comprobar mediante una placa con surcos paralelos en la cual los apoyos estarán alineados si están en una posición correcta. Centrar la muestra en los apoyos y en la carga. Aplicar la carga especificada hasta romper la superficie exterior de la muestra o antes de alcanzar la tensión máxima., tomando datos simultáneos de la desviación de la carga.

CALCULO

Los valores en la ruptura no serán calculados para ninguna muestra que se rompa por un cierto defecto obvio, fortuito.

Cuando un material elástico homogéneo es se prueba en el ensayo de flexión como viga simple apoyada en dos puntos y cargada en el punto medio, la tensión máxima en la superficie externa de la muestra ocurre en el punto mediano. Esta tensión se puede calcular para cualquier punto en la curva carga-desviación por medio de la siguiente ecuación.

$$\sigma_f = 3PI/2bd^2$$

σ_f : Tensión en las fibras externas en el punto medio, MPa [PSI]

P: Carga impuesta en el punto medio dado de la curva Carga-Desviación, N [lbf]

l: Distancia entre los soportes, mm

b: Ancho de la muestra, mm

d: Profundidad de la muestra, mm.

Se aplica para los materiales en los cuales la tensión es lineal proporcional a la tensión hasta el punto de ruptura. La ecuación es válida para obtener datos de comparación.

ENSAYO DE IMPACTO NORMA D-256.

Este método utilizado para la prueba de impacto cubre la determinación de la resistencia de plásticos. Consiste en montar la muestra en una máquina estandarizada que luego es fallada por la oscilación de un péndulo que golpea la muestra con una energía determinada. Los resultados de esta prueba pueden verse afectados por el tratamiento que se le haga a la muesca y la calidad de la muesca, esto en el caso de que se haga necesario realizar este tipo de abertura al material, esto se hace para materiales de gran ductilidad. Los valores arrojados por esta prueba deben darse en unidades del sistema internacional.

SIGNIFICANCIA Y USO

Antes de proceder con la realización de esta prueba, se debe especificar el material a fallar. La prueba de impacto de péndulo indica la energía necesaria para romper una muestra a fallar, esta energía depende del tamaño y geometría de la probeta, de la realización o no de la muesca y de la velocidad de impacto, así como de las especificaciones de la máquina donde se realizará la prueba.

Para materiales relativamente frágiles, para los cuales la energía de propagación de la fractura es pequeña en comparación con la energía de iniciación de la fractura, la energía indicada de impacto absorbida es en todos los casos la suma de estos factores.

El tipo de falla para cada muestra será registrada como una de las cuatro categorías enumeradas como sigue:

- Completo: Cuando la rotura de la muestra es total y se separa en dos o más pedazos.
- Abisagrar: Cuando hay rotura incompleta, tal que una porción de la muestra no puede apoyarse horizontalmente cuando la otra parte se lleva verticalmente.
- Parcial: Rotura incompleta que ha fracturado por lo menos el 90% de la distancia entre la cima de la muesca y del lado opuesto.
- No: Rotura incompleta donde la fractura es menos amplia del 90% de la distancia entre la cima de la muesca y el lado opuesto.

Para materiales resistentes el péndulo puede no tener la energía necesaria para terminar de romper la muestra.

ESPECIFICACIONES DE LAS MUESTRAS

Las muestras tendrán una anchura entre 3.0 y 12.7 mm. Siendo la abertura de la muesca de aproximadamente de 0.05mm, la longitud de ± 63.5 mm, siendo la longitud de la muesca y uno de los lados extremos de 31.8mm y un espesor de 10.6mm. La forma de estas muestras a fallar es paralelepípeda.

CONDICIONAMIENTO

Se deben condicionar las muestras a una temperatura entre 23, 25°C y 50.5% de humedad.

PROCEDIMIENTO

Se preparan muestras con iguales dimensiones y se acondicionan en la máquina elegida para realizar la prueba, esta elección debe estar de acuerdo a la energía que tiene el péndulo para romper la muestra.

La prueba comienza cuando el péndulo inicia su movimiento desde una altura inicial describiendo un arco y posteriormente golpea y rompe la probeta llegando a una altura final.

La prueba debe ser realizada con una velocidad constante para cada una de las muestras a fallar. Es importante tener en cuenta que al usar un péndulo muy pesado esto reducirá la sensibilidad de la lectura del ensayo.

ANEXO B. COMPATIBILIDAD ENTRE LA RPP Y LA DISPERSIÓN PC-ESTIRENO

Muestra 1: 90% RPP + 10% PC-Es

Figura 35



Figura 36



Muestra 2: 80% RPP + 20% PC-Es

Figura 37



Figura 38

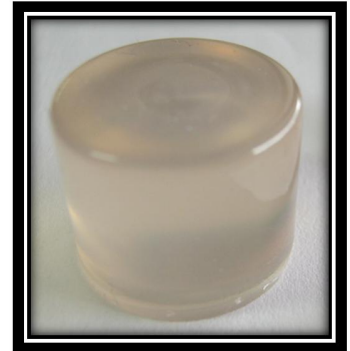


Muestra 3: 70% RPP + 30% PC-Es

Figura 39



Figura 40



Muestra 4: 65% RPP + 35% PC-Es

Figura 41



Figura 42



Muestra 5: 60% RPP + 40% PC-Es

Figura 43



Figura 44



Muestra 6: 50% RPP + 50% PC-Es

Figura 45



Figura 46



Muestra 7: 40% RPP + 60% PC-Es

Figura 47



Figura 48



**ANEXO C. FABRICACIÓN DE AGLOMERADOS REFORZADOS CON
CASCARILLA DE ARROZ**

Muestra 1: 70% Matriz Polimérica + 30% CM

Figura 49



Figura 50



Muestra 2: 65% Matriz Polimérica + 35% CM

Figura 51



Figura 52



Muestra 3: 60% Matriz Polimérica +40% CM

Figura 53



Figura 54



Muestra 4: 55% Matriz Polimérica + 45% CM

Figura 55



Figura 56



Muestra 5: 50% Matriz Polimérica + 50% CM

Figura 57



Figura 58



Muestra 6: 40% Matriz Polimérica + 60% CM

Figura 59



Figura 60



Muestra 7: 30% Matriz Polimérica + 70% CM

Figura 61



Figura 62

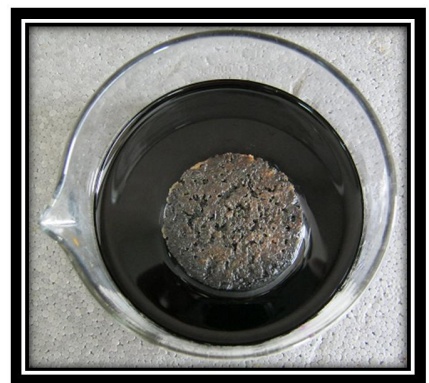


ANEXO D. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS

Figura 63. Pruebas de resistencia química

En ácido sulfúrico:

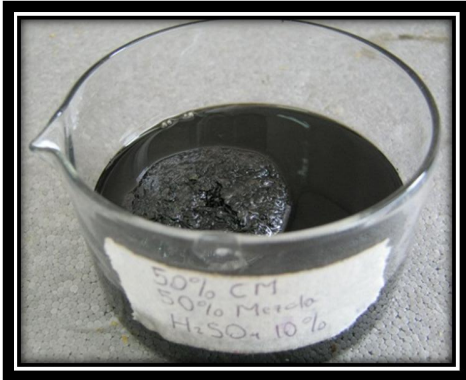
Muestra 3.



Muestra 4.



Muestra 5.

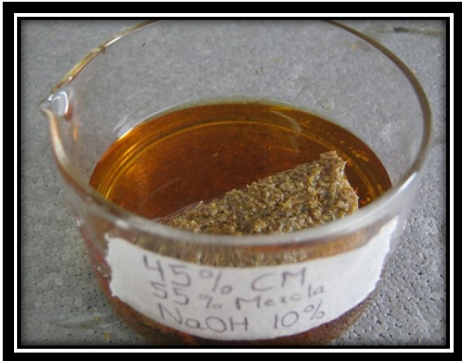


En hidróxido de sodio;

Muestra 3.



Muestra 4.



Muestra 5

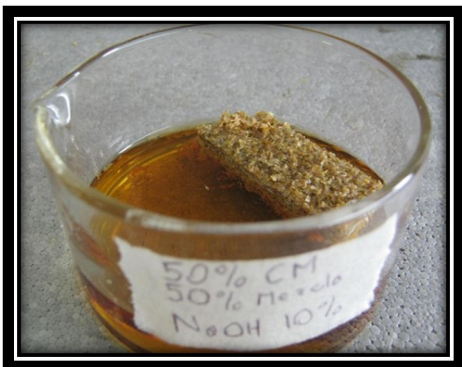


Figura 64. Ensayo de dureza

Muestra 3.



Muestra 4.



Muestra 5.



Sapán



Triplex



Figura 65. Test de llama

Muestra 3



Muestra 4



Muestra 5



ANEXO E. ESPECTROS INFRARROJOS

Figura 66. IR PC post-consumo

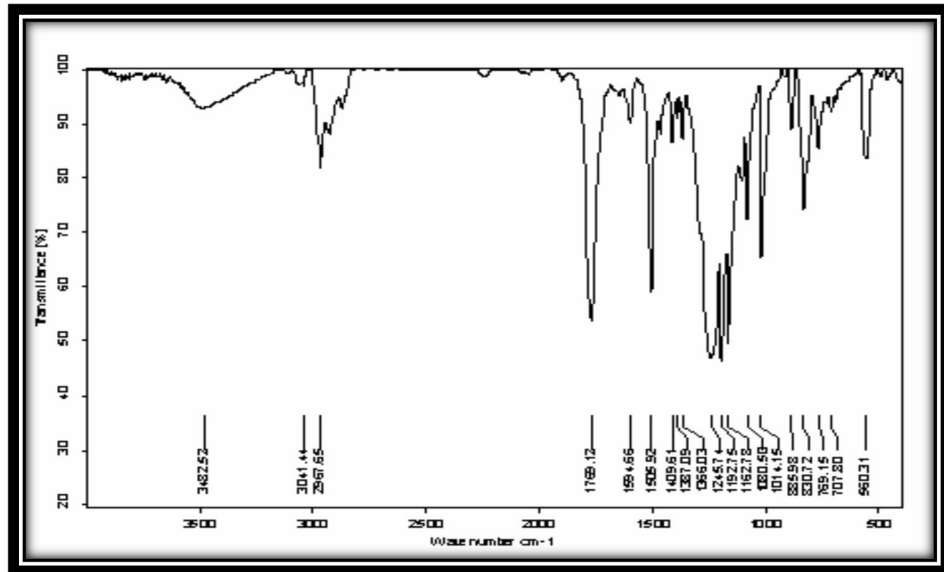


Figura 67. IR dispersión PC-Es

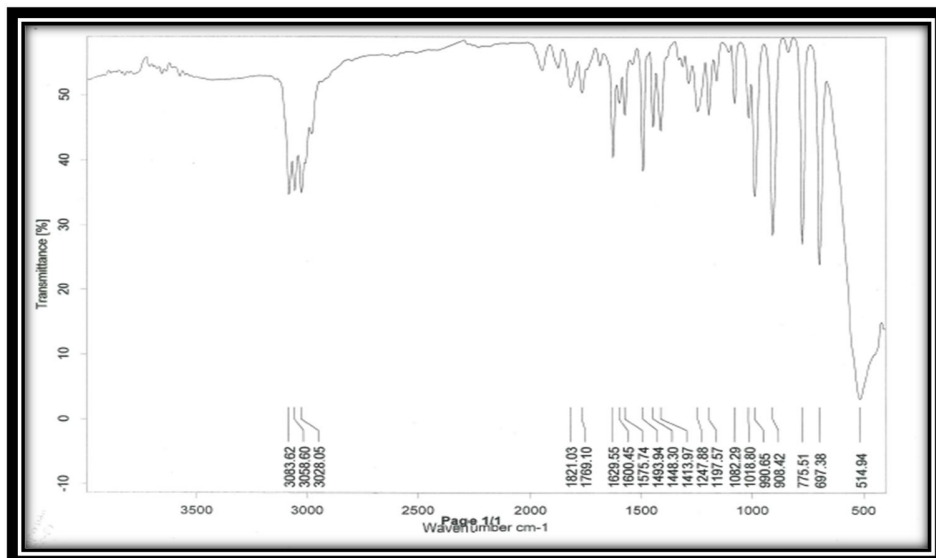


Figura 68. IR RPP

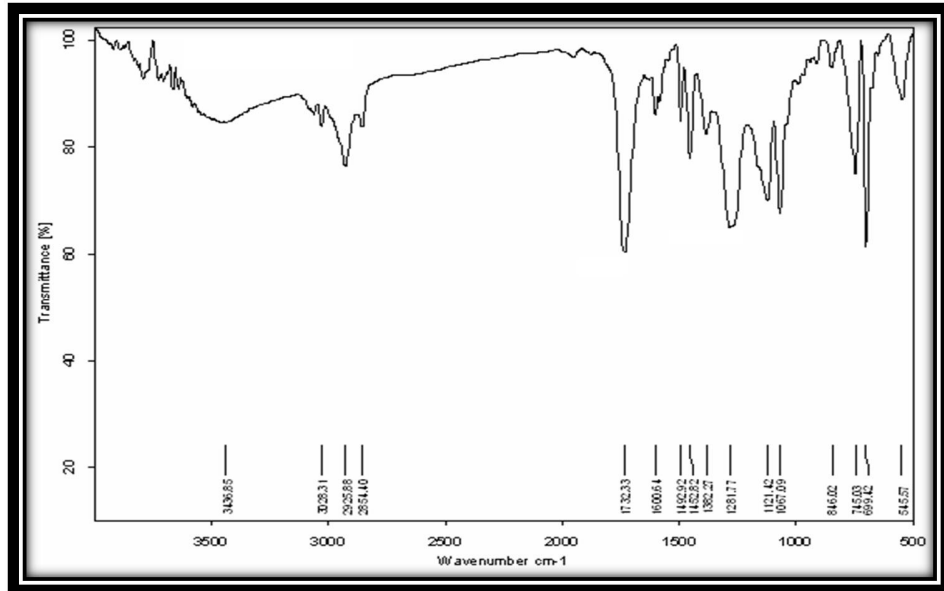
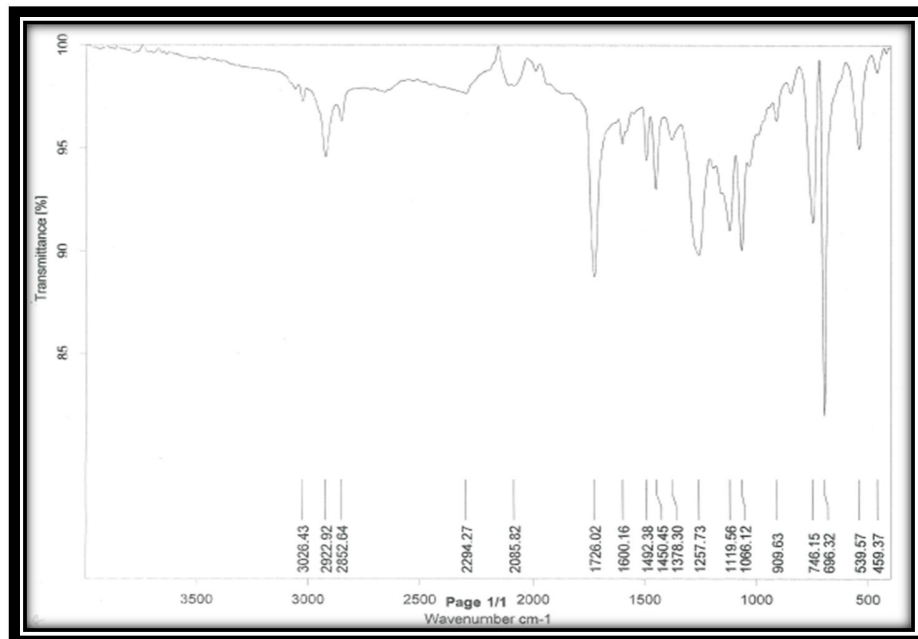


Figura 69. IR matriz polimérica PC-Es/RPP 40/60



ANEXO F. FICHA DE SEGURIDAD DEL ESTIRENO

PROPIEDADES FISICAS

- El estireno es un líquido aceitoso e incoloro de olor aromático con punto de ebullición de 145°C y densidad relativa de vapor igual a 3,6.
- Es insoluble en agua y soluble en alcohol, éter o acetona.
- El estireno es un líquido inflamable cuyos vapores pueden formar mezclas explosivas en el aire.
- Su punto de inflamabilidad es 31°C en copela cerrada y 34°C en copela abierta, su límite inferior de explosividad es de 1,1% en volumen a 29,3°C y el superior 6,1% a 65,2°C.

Punto de ebullición: 145 °C

Punto de fusión: -30.6 °C

Densidad relativa (agua = 1): 0.9

Solubilidad en agua 0.03 g/ml a25°C

Presión de vapor (Pa)

a 10°C: 312

a 20°C: 600

a 30°C: 1095

a 40°C: 1906

Densidad relativa de vapor (aire = 1) 3.6

Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1) 1.02

VIAS DE PENETRACION

Respiratoria:

La exposición humana a estireno se produce principalmente por inhalación.

Oral:

Por ingestión accidental de estireno líquido.

Cutánea:

A través del contacto con la piel cuando está en estado líquido.

DISTRIBUCION Y ALMACENAMIENTO EN EL ORGANISMO

- Tras la exposición por inhalación, la cantidad de estireno absorbido corresponde a un 60 a 70% de la dosis inhalada. Varía en función de los individuos y de las características de la ventilación pulmonar durante la exposición.
- El estireno satura el organismo rápidamente (en 30-40 minutos). El 85% del estireno inhalado y retenido en el organismo, se metaboliza fundamentalmente en el hígado. En menor cantidad, en el tejido muscular y en el pulmón. Cierta cantidad de estireno se fija sin metabolizar en el tejido adiposo subcutáneo y es susceptible de ser movilizada.

EFFECTOS SOBRE LA SALUD

Intoxicación aguda

A) La ingestión accidental de estireno produce.

Alteraciones digestivas: fuerte irritación del tracto gastrointestinal, con dolores abdominales, náuseas, vómitos y diarreas. Estas alteraciones se deben al poder irritante del estireno sobre las mucosas.

B) Por inhalación

La intoxicación aguda en la industria se debe, en la mayor parte de las ocasiones, a la inhalación de vapor de estireno. Los vapores de estireno pueden causar intoxicación aguda, con síntomas iniciales Tales como:

- Irritación nasal, con sensación de picazón.
- Irritación de boca.
- Irritación de garganta.
- Irritación del tracto respiratorio.

OTROS EFECTOS DE TIPO AGUDO TIENEN LUGAR EN:

- La piel: El contacto de la piel con el estireno líquido da lugar a dermatosis de irritación (piel seca y escamosa), como consecuencia de su acción desengrasante y desecante. En animales de experimentación se ha visto que la irritación cutánea

puede ser lo suficientemente intensa como para causar ampollas y necrosis tisulares.

- Los ojos: Irritación de la conjuntiva ocular con enrojecimiento e hipersecreción lacrimal (conjuntivitis), que desaparece al cabo de dos o tres días sin dejar secuelas.

INTOXICACION CRONICA

Por inhalación: La intoxicación crónica se produce por inhalación constante y diaria del vapor del estireno que se esparce en el ambiente de trabajo. Puede producir irritación de vías respiratorias altas por el efecto irritante del estireno sobre la mucosa del árbol respiratorio, produciéndose:

- Picazón de nariz a una concentración de 50 ppm. En las exposiciones crónicas, el organismo se va habituando y se reduce esta sensación.
- Tos.
- Alteraciones digestivas: Pérdida de apetito, náuseas y decaimiento. Estos síntomas sedan con más frecuencia en aquellos sujetos que padecen alteraciones digestivas, tales como, hernia de hígado y gastritis.