

**“RECUPERACIÓN DE POLICARBONATO POST-CONSUMO A PARTIR DE
DISCOS COMPACTOS E INCORPORACIÓN A UNA FORMULACIÓN DE
RESINAS FENOL FORMALDEHÍDO”**

**CAROLINA ESTEBAN CIFUENTES. CÓDIGO 1991469
BIBIANA MARCELA FRANCO LÓPEZ. CÓDIGO 1981458**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA
2006**

**“RECUPERACIÓN DE POLICARBONATO POST-CONSUMO A PARTIR DE
DISCOS COMPACTOS E INCORPORACIÓN A UNA FORMULACIÓN DE
RESINAS FENOL FORMALDEHÍDO”**

**CAROLINA ESTEBAN CIFUENTES. CÓDIGO 1991469
BIBIANA MARCELA FRANCO LÓPEZ. CÓDIGO 1981458**

DIRECTOR DEL PROYECTO
M.Sc. JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ

CODIRECTOR
Dr. EDGAR FERNANDO CASTILLO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA
2006**

AGRADECIMIENTOS

A los profesores JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ y EDGAR CASTILLO por sus valiosos aportes, su paciencia y la dirección de esta investigación.

A los profesores ANGELA MONTAÑO y CLAUDE EWERT por sus recomendaciones y la evaluación de este proyecto.

A los profesores GUILLERMO GONZÁLEZ y RODRIGO TORRES por su colaboración incondicional en todo momento.

A la escuela de Química por facilitarnos los equipos necesarios para realizar los análisis de espectroscopia Infrarroja.

A la escuela de Ingeniería Civil por la realización de los ensayos de Resistencia de Materiales.

A los auxiliares de laboratorio Jorge, Adolfo, Jairo, Alejandro, Eduardo, Wilson y Javier por su paciencia y colaboración en el desarrollo experimental de este trabajo.

A nuestras compañeras de Laboratorio Melba, Olga, Patricia, Carolina y Sandra por su amistad, por su tolerancia y soporte a lo largo de nuestra investigación.

A nuestros familiares y amigos que contribuyeron de uno u otra manera en el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres Olga y Néstor por su amor y gran apoyo en todo momento

A mi hermana Paola por su confianza y constante esfuerzo

A mis sobrinos: la razón de mi vida

A Nando por su cariño, compañía y colaboración

A Bibiana por su amistad

CAROLINA ESTEBAN CIFUENTES

DEDICATORIA

*A mis padres Yolanda y Carlos por su apoyo incondicional, amor y comprensión.
A mi hija Paula Alejandra, lo más lindo e importante de mi vida,
A mi hermanito por su compañía y colaboración,
A mi esposo Armando por su amor y apoyo constante,
A mis amigos Olga, Nando, Melba, Yamile, Cora y Julio
por su amistad y comprensión,
A Carito por su amistad y constancia en el trabajo.*

BIBIANA M. FRANCO LOPEZ

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 MATERIALES PLÁSTICOS	20
2.1.1 Termoplásticos.....	22
2.1.2 Termoestables	23
2.2 RECICLAJE DE PLÁSTICOS	23
2.2.1 Reciclado mecánico.....	25
2.2.2 Reciclado químico.....	25
2.3 EL POLICARBONATO: HISTORIA.....	26
2.4 SÍNTESIS DEL POLICARBONATO	26
2.5 COMPORTAMIENTO QUÍMICO DEL POLICARBONATO	28
2.6 PROPIEDADES DEL POLICARBONATO	29
2.7 USOS Y APLICACIONES DEL POLICARBONATO	30
2.8 COMPOSICIÓN DE LOS DISCOS COMPACTOS	31
2.8.1 Soporte de policarbonato	31
2.8.2 Tintes	31
2.8.3 Capa reflectiva	32
2.8.4 Laca de protección acrílica y etiqueta.....	32
2.9 RECICLAJE DE DISCOS COMPACTOS.....	32
2.10 RESINAS FENÓLICAS	34
2.10.1 Aplicaciones de las resinas fenol formaldehído.	35
2.10.2 Modificación de las resinas fenol formaldehído	36
2.10.3 Resol.....	37
2.10.3.1 Obtención y producción.	37
2.10.3.2 Materias primas.	38
2.10.3.3 Mecanismo.....	39

2.10.3.4 Propiedades.....	42
2.11 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS	44
2.11.1 Ensayos físicos para evaluar la resistencia de materiales	44
2.11.1.1 Compresión.....	44
2.11.1.2 Flexión.	46
2.11.1.3 Tracción	47
2.11.1.4 Impacto.	47
2.11.2 Propiedades físicas y químicas.....	47
2.11.2.1 Densidad aparente.....	48
2.11.2.2 Porosidad y absorción.....	49
2.11.2.3 Resistencia a reactivos químicos.....	49
2.11.3 Técnicas instrumentales	49
2.11.3.1 Espectroscopia de Infrarrojo.	50
3. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	51
3.1 REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE LOS DISCOS COMPACTOS	52
3.2 PRUEBAS DE SOLUBILIDAD	52
3.3 SELECCIÓN DEL SOLVENTE	52
3.4 DISPERSIÓN DEL MATERIAL EN FENOL	53
3.5 EXTRACCIÓN DEL POLICARBONATO.....	53
3.6 CARACTERIZACIÓN DEL POLICARBONATO	55
3.6.1 Espectroscopía Infrarroja.....	55
3.6.2 Resistencia a reactivos químicos.....	55
3.6.3 Densidad Aparente	56
3.6.4 Punto de fusión	56
3.6.5 Absorción de agua en 24 horas	56
3.7 INCORPORACIÓN DEL POLICARBONATO A UN RESOL	57
3.7.1 Síntesis del resol.....	57
3.7.2 Modificación del resol	58
3.8 CARACTERIZACIÓN DEL RESOL MODIFICADO	58
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	60

4.1 PRUEBAS DE SOLUBILIDAD DE LOS DISCOS COMPACTOS	60
4.2 EXTRACCIÓN DEL POLICARBONATO	61
4.3 CARACTERIZACIÓN DEL POLICARBONATO EXTRAÍDO	63
4.3.1 Espectro Infrarrojo	63
4.3.2 Resistencia a reactivos químicos	64
4.3.3 Densidad aparente	66
4.3.4 Punto de fusión	67
4.3.5 Absorción de agua en 24 horas	67
4.4 CARACTERIZACIÓN DEL RESOL MODIFICADO CON PC	68
4.4.1 Resistencia a la compresión	69
4.4.2 Resistencia a ácidos y bases	74
4.4.3 Densidad	76
4.4.4 Temperatura de descomposición	77
4.4.5 Absorción de agua en 24 horas	77
4.5 BALANCES DE MASA	78
4.6 APLICACIONES	80
5. CONCLUSIONES	82
6. RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXOS	89

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Monómero constituyente del policarbonato de bisfenol A	27
Figura 2. Primera etapa de la síntesis del policarbonato de bisfenol A	27
Figura 3. Segunda etapa de la síntesis del policarbonato de bisfenol A	28
Figura 4. Composición de los discos compactos	31
Figura 5. Formación del ión fenolato.	40
Figura 6. Metilolación en posiciones orto y para	40
Figura 7. Formación del monómero.	41
Figura 8. Incremento del peso molecular	41
Figura 9. Formación del retículo	42
Figura 10. Resistencia a la compresión	44
Figura 11. Graficas para materiales dúctiles y frágiles	44
Figura 12. Diagramas reales de $\sigma - \epsilon$	45
Figura 13. Modelo empleado para el esfuerzo flector	46
Figura 14. Resistencia a la tracción	47
Figura 15. Principio de Arquímedes	48
Figura 16. Diagrama del diseño experimental	51
Figura 17. Extracción Soxhlet	54
Figura 18. Fusiómetro Fisher Scientific	56
Figura 19. Reflujo de la mezcla de reacción	57
Figura 20. Máquina Universal de ensayos	59
Figura 21. Policarbonato extraído	63
Figura 22. Espectro IR tomado al policarbonato extraído	64
Figura 23. Destrucción del policarbonato en bases fuertes	66
Figura 24. Resol modificado con policarbonato	68
Figura 25. Grafica Deformación unitaria vs Esfuerzo para el resol	

modificado	70
Figura 26. Grafica de Deformación unitaria vs Esfuerzo para el resol	70
Figura 27. Comparación de espectros IR del resol y PC con el del resol modificado	73
Figura 28. Posible estructura del resol-policarbonato	74
Figura 29. Ataque básico a un resol	76
Figura 30. Balance de masa para la dispersión en fenol	78
Figura 31. Balance de masa para la extracción Soxhlet	79
Figura 32. Balance de masa para la síntesis del resol	80
Figura 33. Resol modificado con aserrín como carga	81
Figura 34. Resol modificado espumado con aserrín como carga	81

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Códigos de identificación visual de los distintos tipos de plásticos	24
Tabla 2. Catalizadores de condensación	39
Tabla 3. Propiedades de los resoles	43
Tabla 4. Resultados de ensayos preliminares de solubilidad	60
Tabla 5. Porcentajes de recuperación después de la extracción Soxhlet	62
Tabla 6. Señales de espectroscopia IR para el policarbonato	63
Tabla 7. Resistencia a ácidos del policarbonato obtenido	65
Tabla 8. Resistencia a bases del policarbonato obtenido	65
Tabla 9. Densidad del policarbonato extraído	66
Tabla 10. Temperatura de fusión del policarbonato extraído	67
Tabla 11. Absorción de agua en 24 horas para el PC extraído	67
Tabla 12. Comparación datos experimentales y teóricos del policarbonato	68
Tabla 13. Deformación unitaria vs Esfuerzo del resol-PC	69
Tabla 14. Datos para el grafico Deformación unitaria vs Esfuerzo del resol	71
Tabla 15. Resistencia a rotura y modulo de elasticidad para el Resol-PC y el Resol	72
Tabla 16. Resistencia al ataque ácido del resol y resol-PC	75
Tabla 17. Resistencia al ataque básico del resol y resol-PC	75
Tabla 18. Densidad del resol modificado	76
Tabla 19. Densidad del resol	77
Tabla 20. Absorción del agua en 24 horas para el Resol-PC y el Resol	78

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tablas de propiedades del Policarbonato	89
Anexo B. Descripción de las materias primas del resol	91

ABREVIATURAS

PC	Policarbonato
CD's	Discos compactos
RSUD	Residuos sólidos urbanos domésticos
CD's-fenol	Mezcla saturada de discos compactos en fenol concentración 68.35%
Resol-PC	Resol modificado con adición de policarbonato
IR	Infrarrojo/a
ASTM	American Society for Testing and Materials
RFT	Resinas fenólicas técnicas
RFMA	Resinas fenólicas para madera y aislantes
RFPM	Resinas fenólicas para polvos de moldeo
ppb	Partes por billón
LP	Límite de proporcionalidad

RESUMEN

TITULO: RECUPERACIÓN DE POLICARBONATO POST- CONSUMO A PARTIR DE DISCOS COMPACTOS E INCORPORACIÓN A UNA FORMULACIÓN DE RESINAS FENOL FORMALDEHÍDO*

AUTORAS: ESTEBAN CIFUENTES, Carolina
FRANCO LOPEZ, Bibiana Marcela**

PALABRAS CLAVES: Reciclado de plásticos, policarbonato, reciclado de discos compactos, resol, resinas fenólicas, reciclado fisicoquímico.

DESCRIPCIÓN: Debido al incremento de la contaminación ambiental causado por la baja biodegradabilidad de los plásticos se ha hecho necesario buscar e implementar nuevas formas de reciclado de estos materiales. En Bucaramanga se han desarrollado programas de gestión ambiental con el propósito de concientizar a la población acerca de la importancia de separar adecuadamente los residuos sólidos en los hogares ya que estos tienen como sitio de disposición final el relleno sanitario “El Carrasco”, al cual le queda poco tiempo de vida útil.

Este proyecto desarrolló una alternativa de reciclaje de los discos compactos (CD's) desechados, recuperando su componente principal, el policarbonato (PC), para emplearlo como materia prima en la fabricación de nuevos productos moldeados, e incorporarlo a materiales como los resoles, con el fin de mejorar sus propiedades. Se utilizaron procedimientos físicos y químicos como reducción del tamaño de partícula, dispersión en el solvente, extracción del polímero e incorporación de la dispersión a un resol.

El policarbonato post-consumo obtenido presentó buenas características físicas y químicas, así como con una buena resistencia al ataque por ácidos débiles y solventes, y una absorción de agua mínima, razón por la cual puede ser utilizado como materia prima en la fabricación de diferentes productos en los que se requiera un material con excelentes propiedades. Además, fue posible incorporar el policarbonato (PC) en resoles para la obtención de resinas fenólicas modificadas, con una variación significativa de las propiedades mecánicas del material.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ciencias. Química. GUTIÉRREZ, José Carlos

ABSTRACT

TITLE: RECUPERACIÓN DE POLICARBONATO POST- CONSUMO A PARTIR DE DISCOS COMPACTOS E INCORPORACIÓN A UNA FORMULACIÓN DE RESINAS FENOL FORMALDEHÍDO*

AUTHORS: ESTEBAN CIFUENTES, Carolina
FRANCO LOPEZ, Bibiana Marcela**

KEY WORDS: Plastics recycling, polycarbonate, recycling of compact discs, resol, phenolic resins, physical chemistry recycling.

DESCRIPTION: Due to the increment of the environmental contamination caused by low biodegradability of plastics, it has become necessary to look for and to implement new forms of having recycled of these materials. In Bucaramanga, programs of environmental administration have been developed with the purpose of making aware the population about the importance of separating the solid residuals appropriately, since they have as place of final disposition the environmental filler "El Carrasco" that it has little time of useful life.

This project has developed an alternative waste compact disks recycling (CD's) recovering its main component, polycarbonate (PC), to use it like raw material in the production of new modeled products and incorporate it to materials like glares, with the purpose of improving its properties using physical and chemical procedures as reduction of the particle size, dispersion in the solvent, extraction of the polymer and incorporation of the dispersion to a glare.

Polycarbonate obtained post consumption presented good physical and chemical characteristics, as well as a good resistance to the attack for weak acids, solvents and an absorption of minimum water, reason for which can be used like raw material in the production of different products, where this material is required with excellent properties. Also, it was possible to incorporate the polycarbonate in glares for obtaining of modified phenolics resins, with a significant variation of the mechanical properties of the material.

*Project of grade

**Science faculty. Chemistry. GUTIÉRREZ, José Carlos

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 Farben Fabriken 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 A¹. 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 particular².

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.

Actualmente los plásticos se reciclan por procesos físicos, donde el material es sometido a recolección, lavado, molienda, fundición y finalmente moldeo para su nuevo uso. A medida que se repite el proceso, el material pierde calidad.

Otra alternativa menos utilizada por su elevado costo es el reciclado químico que busca obtener los reactivos de partida para la síntesis del polímero³.

En este trabajo se muestra un proceso de reciclaje fisicoquímico del policarbonato postconsumo de discos compactos mediante dispersión en el solvente (fenol), empleando un método de extracción adecuado para obtener un producto con un alto grado de uniformidad, de manera tal que pueda ser empleado en el moldeo de nuevos objetos. La dispersión del material en el solvente se utilizó para incorporarlo a resinas fenol formaldehído, ya que este es reactivo para el proceso y permite modificar el resol proporcionando excelentes propiedades.

El reciclaje tiene como objetivo dar un valor agregado al residuo plástico transformándolo en materia prima básica, considerándose como una alternativa real para el desarrollo de nuevas tecnologías.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 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 petroquímicos y son de base hidrocarbonada. 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 fisicomecánicas, 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 termoestables⁴.

2.1.1 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.

2.1.2 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 curado⁵.

2.2 RECICLAJE DE PLÁSTICOS

Debido a que día a día aumenta el uso de plásticos en la vida cotidiana y a su baja biodegradabilidad, los residuos plásticos constituyen un problema medioambiental de primera magnitud, por tanto su reciclaje en los últimos años se ha incrementado.

El destino final de los residuos plásticos es mayoritariamente el vertedero donde representan aproximadamente un 20% en volumen. En Bucaramanga, al sitio de disposición final de un alto porcentaje de los residuos sólidos urbanos domésticos (RSUD) conocido como “El Carrasco” le queda poco tiempo de vida útil, problemática que no solo afecta a esta ciudad sino a muchas ciudades del mundo⁶.

Por otra parte la valorización energética, una alternativa de reciclaje, persigue aprovechar el elevado contenido energético de los materiales plásticos ($\sim 42 \text{ MJ kg}^{-1}$) claramente superior a los de carbón y madera (29 y 16 MJ kg^{-1} respectivamente). Las incineradoras modernas con un adecuado control de emisiones permiten recuperar más del 60% de esta energía.

Los plásticos también se están utilizando como combustibles sólidos para hornos de cemento e industria siderúrgica. No obstante, no se puede evitar la emisión de compuestos altamente tóxicos como dioxinas y furanos que son cancerígenos a concentraciones muy bajas (ppb o incluso menores).

El reciclado persigue rentabilizar el residuo transformándolo en nuevos productos plásticos (reciclado mecánico) o en materia prima química (reciclado químico).







CÓDIGO	PLÁSTICO
	PET, Polietilén tereftalato
	HDPE, Polietileno de alta densidad
	PVC, Cloruro de polivinilo
	LDPE, Polietileno de baja Densidad
	PP, Polipropileno
	PS, Poliestireno
	Otros: PU, Poliuretano; PC, Policarbonato

Tabla 1. Códigos de identificación visual de los distintos tipos de plásticos

Un inconveniente para ambos tipos de reciclaje fue la separación de los diferentes tipos de polímeros, afortunadamente esto se facilitó con la adopción de códigos de identificación visual (los cuales se muestran en la Tabla 1). Por

consiguiente, actualmente se considera el reciclaje mecánico y/o químico como una opción viable y económica.

2.2.1 Reciclado mecánico

Como se mencionó anteriormente, 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.

2.2.2 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 de bajo peso molecular³.

2.3 EL POLICARBONATO: 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 Unidos⁷.

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 aditivos⁸.

2.4 SÍNTESIS DEL POLICARBONATO

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 policarbonato⁹.

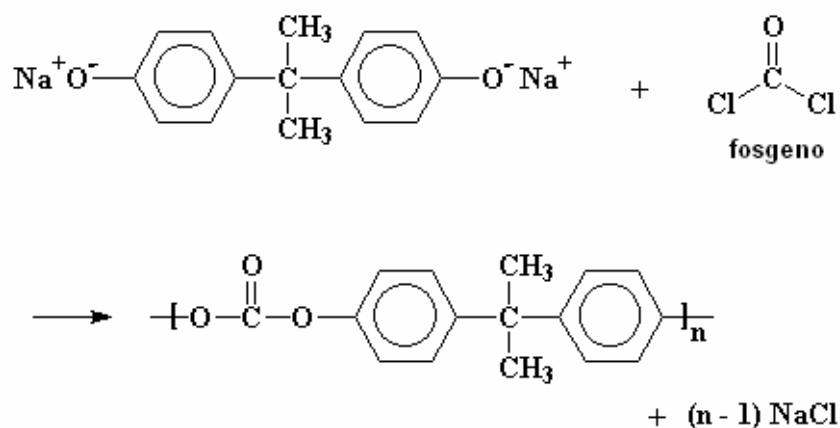


Figura 3. Segunda etapa de la síntesis del policarbonato de bisfenol A

2.5 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, cicloalifáticos 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 bencol, la tetralina, el tetracloruro 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 elevadas¹.

2.6 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 porcelana¹.

2.7 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 térmico¹⁰, 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.

Mencionaremos los rulos, clips, cajas petri y horquillas para el cabello, ya que se pueden ver las ventajas que aporta la fabricación de estos objetos a base de policarbonato¹.

2.8 COMPOSICIÓN DE LOS DISCOS COMPACTOS

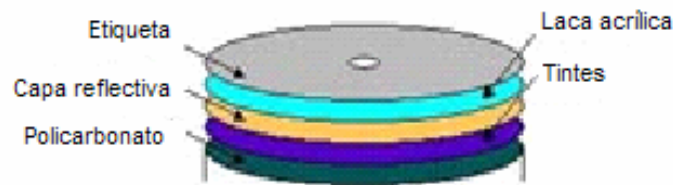


Figura 4. Composición de los discos compactos

2.8.1 Soporte de policarbonato

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

2.8.2 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.

2.8.3 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.

2.8.4 Laca de protección acrílica y etiqueta

Estos elementos pueden significar riesgo debido a la contracción generada durante su proceso de manufactura¹¹.

2.9 RECICLAJE DE DISCOS COMPACTOS

En el año 2004 se consumieron globalmente cerca de dos millones ciento sesenta y siete mil (2'167.000) toneladas de policarbonato, empleado principalmente en la industria automotriz, en construcción y en la producción de CDs y DVDs

Datos proporcionados por la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN) indican que en dicho año se importaron a Colombia diez millones seiscientos ochenta y cuatro mil doscientos ochenta y siete (10'684.287) discos compactos y en el mismo periodo la empresa nacional CD Systems fabricó aproximadamente treinta millones (30'000.000). En total en el país fueron consumidos alrededor de cuarenta millones seiscientos ochenta y cuatro mil doscientos ochenta y siete (40'684.287) CDs durante el 2004.

Basados en la magnitud de estos datos, sabiendo que en Colombia no existe un plan de reciclaje para discos compactos y teniendo en cuenta que los CDs que se venden en el mercado serán total o parcialmente ilegibles a los dos años de

haberlos grabado⁷, anualmente son desechados aproximadamente (20'342.143) CDs en nuestro país.

Los discos compactos inservibles son considerados gran fuente de contaminación ambiental, ya que su destino final es principalmente, el relleno sanitario que contamina con metales pesados el suelo y el agua subterránea o la incineración que produce compuestos peligrosos como dioxinas y furanos los cuales pueden formarse durante la combustión.

Para solucionar esta problemática, la multinacional Bayer Polymer S.A. fabricante de policarbonato, tiene un programa de reciclaje donde maneja alrededor de 335 millones de discos compactos al año los cuales somete a un proceso químico para eliminar el aluminio, las lacas y los tintes de impresión, finalmente mediante extrusión reutiliza el policarbonato, Bayer advierte que en este proceso de reciclaje mecánico el policarbonato obtenido no tiene la misma calidad que el producto virgen, por lo tanto no se emplea nuevamente en la fabricación de discos compactos, pero si en la fabricación de otro tipo de productos^{12,13}

Otro método por el cual se reciclan no solo discos compactos sino cualquier tipo de productos compuestos primordialmente por policarbonato, se basa en un tratamiento químico con NaOH acuoso seguido de una acidulación con HCl, obteniendo el monómero de partida del policarbonato¹⁴. Pero la síntesis del policarbonato se realiza utilizando fosgeno, que es fuente de contaminación por su toxicidad, razón por la cual grupos de investigación de diferentes partes del mundo estudian una nueva forma de sintetizar el policarbonato sin emplear fosgeno¹⁵

2.10 RESINAS FENÓLICAS

Las resinas fenólicas, también conocidas como baquelitas son productos resultantes de la condensación del fenol, o mezcla de fenoles, con un aldehído. Es posible diferenciar dos tipos de resinas fenólicas: resoles y novolacas, según las condiciones en que transcurra la reacción (relación entre reactivos, pH y temperatura).

La diferencia fundamental entre ambos materiales es que los resoles presentan en su estructura química grupos metiloles que se entrecruzan como consecuencia de un aumento de temperatura, dando lugar a productos reticulados, insolubles e infusibles; las novolacas por su parte no entrecruzan por acción del calor, sino que necesitan de la adición de un catalizador, habitualmente hexametilentetramina (hexamina), responsable del entrecruzamiento final de las cadenas moleculares.

La principal ventaja de las resinas fenólicas frente al resto de los polímeros se basa en la versatilidad del producto final, es decir, la posibilidad de ajustar las propiedades finales del producto obtenido mediante la variación de la naturaleza de los reactivos o de las condiciones de reacción, así como la selección de los aditivos con que se mezcle la resina base.

Por otro lado, la posibilidad de fabricar compuestos a partir de resinas fenólicas y fibras naturales o sintéticas (fundamentalmente recicladas), junto con la facilidad de procesado de material, ha hecho que las resinas fenólicas sigan teniendo un lugar destacado en la producción y aplicación de estos materiales y sus derivados.

2.10.1 Aplicaciones de las resinas fenol formaldehído.

Las resinas fenólicas se utilizan ampliamente en la industria: en laminados, espumas, baños y adhesivos, recubrimientos, contenedores de comida, formando la base de barnices y pinturas, materiales abrasivos (piedras de afilar, muelas, fresas, cintas, etc), materiales de fricción (zapatas, discos de freno) y tintas de imprenta entre otros.

Según su campo de aplicación pueden ser clasificadas en tres grandes grupos:

- Resinas fenólicas técnicas (RFT): que se utilizan para abrasivos, materiales de fricción, textiles, fundición, filtros, lacas y adhesivos.
- Resinas fenólicas para madera y aislantes (RFMA): tienen su campo de aplicación en lanas minerales, impregnaciones, materiales de madera, espumas.
- Resinas fenólicas para polvos de moldeo (RFPM): que son suministradores de las industrias eléctrica, automovilística y electrodoméstica.

La carga más utilizada es la harina de madera. Si se exigen características de resistencia a la humedad y estabilidad dimensional se usan talcos, carbonato de calcio, amianto, mica (aplicaciones eléctricas) y fibras de vidrio cortas. En caso de necesitar buenas propiedades mecánicas se introduce algodón. Algunos materiales de moldeo contienen cargas de grafito y bisulfuro de molibdeno, para mejorar el coeficiente de rozamiento.

La utilización de los materiales de moldeo es dirigida a la fabricación de accesorios eléctricos, utensilios domésticos, cajas de fusibles, conmutadores, soportes, bobinas, partes de teléfonos.

Otra aplicación importante son las espumas fenólicas que poseen una serie de ventajas frente a otro tipo de aislantes tales como una gran resistencia a la llama, reducida emisión de humos, toxicidad nula y poco peso. Son utilizadas

generalmente en la industria de la construcción, recubrimientos de recipientes y tubos en industrias de proceso, circuitos de refrigeración y ventilación.

El empleo de las resinas fenólicas se debe fundamentalmente a las propiedades que presenta:

- Rigidez y resistencia superficial.
- Elevada resistencia a altas temperaturas.
- Estabilidad dimensional.
- Ausencia de corrosión.
- Resistencia a los disolventes.
- Reducida transmisión de calor y aislamiento eléctrico¹⁶.

Entre sus propiedades más importantes se destacan la resistencia al uso y a la humedad, las buenas propiedades mecánicas, sus excelentes propiedades aislantes, su resistencia a la llama y su reducida densidad de humos y toxicidad

2.10.2 Modificación de las resinas fenol formaldehído

La modificación de resinas fenólicas tiene como propósito uno o más de los siguientes objetivos:

- Mejoramiento de las características de la resina, particularmente solubilidad, color y estabilidad del color.
- Mayor flexibilidad de la resina curada.
- Unión más fuerte y/o adhesión a materiales específicos.
- Composición específica para una aplicación. Ej.: intercambio de iones.
- Reducción de costos.

Los métodos más importantes utilizados para modificar la resina son:

- Agregando antes de la condensación del fenol y el formaldehído, una sustancia que co-condensaría con ellos.

- Hacer reaccionar un condensado intermediario fenol-formaldehído con otro material reactivo.
- Mezclar un condensado intermedio fenol-formaldehído con un segundo material resinoso.
- Adicionando un compuesto químico, el cual mejoraría las propiedades de la resina fenólica cuando se cure.

2.10.3 Resol

Formado por la reacción de exceso de formaldehído con fenol en presencia de una base. Esta contiene grupos hidroximetilo, los cuales pueden condensarse luego con calentamiento. La naturaleza del condensado varía con el iniciador de policondensación alcalino utilizado. Por ejemplo, el amoníaco introduce nitrógeno en la molécula del polímero y le confiere al condensado poca solubilidad en agua, a diferencia de aquellos preparados con soda cáustica.

2.10.3.1 Obtención y producción. En la producción de este tipo de resinas, la relación molar fenol / formaldehído se encuentra en el rango 1: (1 - 3). La relación de iniciador basado en fenol es 1:(1 - 0.01). (La descripción de las materias primas junto con sus fichas de seguridad se puede ver en el anexo B).

Se requiere un buen control de la temperatura y del tiempo de reacción, la destilación se finaliza cuando se obtiene un contenido de resina deseado. La viscosidad de la resina puede ser regulada mediante una condensación posterior a 70 °C.

Según el grado de avance de la reacción de policondensación es posible obtener:

- Resinas de bajo peso molecular, líquidas, solubles en agua.

- Resinas de peso molecular más elevado, insolubles en agua, pero solubles en metanol.
- Resinas de muy alto peso molecular (>1000), sólidas, triturables.

2.10.3.2 Materias primas. Para la producción de los resoles las materias primas fundamentales son el fenol y formaldehído en presencia de un iniciador ácido o básico.

Fenol. La característica estructural principal de un fenol, que determina su reactividad con aldehídos es su funcionalidad. Esto puede definirse como el número total de posiciones no sustituidas en el anillo del benceno que está en posición orto o para al grupo hidroxilo.

La velocidad de la reacción no es siempre el factor determinante en la selección de un fenol para la producción de una resina específica; así, los fenoles para-sustituidos aunque reaccionan mas lento que los de tipo meta sustituidos, se escogen preferiblemente para la producción de resinas utilizadas en recubrimiento de superficies, debido a que estos dan resinas de mejor solubilidad en aceite y estabilidad del color.

Aldehídos. De los aldehídos utilizados para las resinas fenólicas, únicamente el formaldehído y el furfural son de importancia comercial, frecuentemente los aldehídos mayores tienden a polimerizarse ellos mismos en presencia de ácidos o bases fuertes lo que limita su uso en la producción de estas resinas.

El formaldehído empleado para la producción de la resina es una solución al 37%, este se inhibe con la adición del 7 al 15% de metanol para que no se precipite como polímero.

Iniciadores. Existe gran variedad de reactivos que se utilizan como iniciadores de la policondensación, los más importantes se muestran en la tabla 2.

TIPO	CARACTERÍSTICAS
Medio ácido	
Ácido fórmico	La acidez de la fórmula comercial, es algunas veces suficiente a elevadas temperaturas.
Ácido clorhídrico	En algunos casos, proporciona mejores resultados que los ácidos sulfúrico y fosfórico.
Ácido oxálico	Resinas de brillo y color.
Ácido fosfórico	Resinas de brillo y color.
Ácido sulfúrico	Popular por precio, volatilidad y fácil manejo.
Medio alcalino	
Hidróxido de sodio	Usado en muchas formulaciones de resinas líquidas.
Carbonato de sodio	Usado en lugar de la soda cáustica para efectos especiales.
Hidróxido de potasio	Usado en lugar de la soda cáustica para efectos especiales.
Carbonato de potasio	Usado en condensaciones fenol-furfural.
Hidróxido de bario	Frecuentemente utilizado en combinación con otros.
Componentes cuaternarios de amonio	Más costosos que la soda cáustica.
Amoníaco	Adiciona nitrógeno en la molécula de la resina.
Aminas	Forma componentes de N divisiones en la resina.

Tabla 2. Iniciadores de policondensación

2.10.3.3 Mecanismo. Para la reacción de fenol y formaldehído bajo condiciones básicas con exceso molar en formaldehído. La relación molar fenol-formaldehído es 1:(1.2-3) y el catalizador empleado es el NaOH.

La formación del resol se produce mediante los siguientes pasos:

1. Se forma el anión fenolato con deslocalización de la carga negativa en las posiciones orto y para (figura 5).

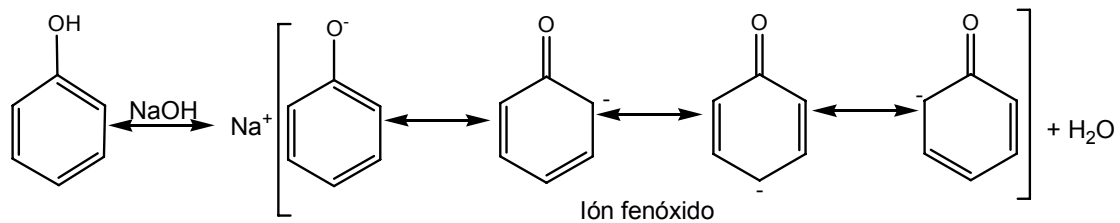


Figura 5. Formación del ión fenolato.

2. A continuación tiene lugar la metilolación con sustitución orto favorecida por iones Ba^{+2} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , (pH bajos) o para favorecida por iones K^+ , Na^+ , (pH altos)

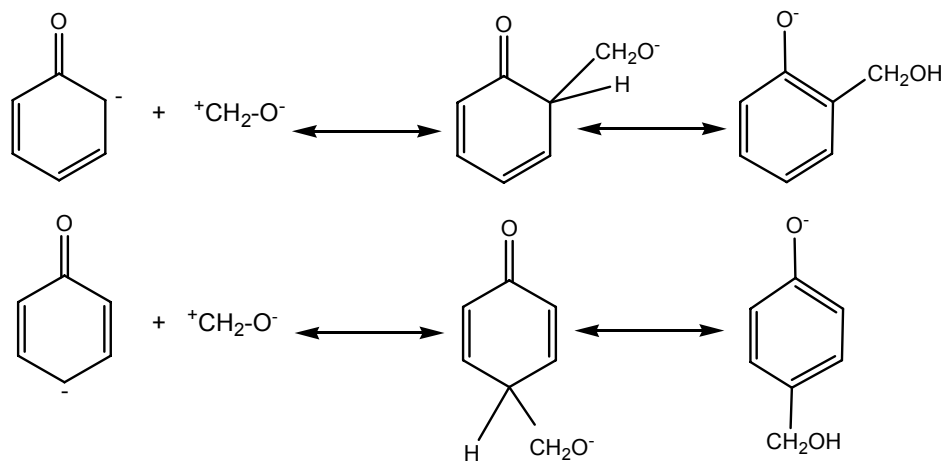


Figura 6. Metilolación en posiciones orto y para

3. Polimetilolación, estos productos son los monómeros de la siguiente etapa de la reacción, su formación se muestra en la figura 7.

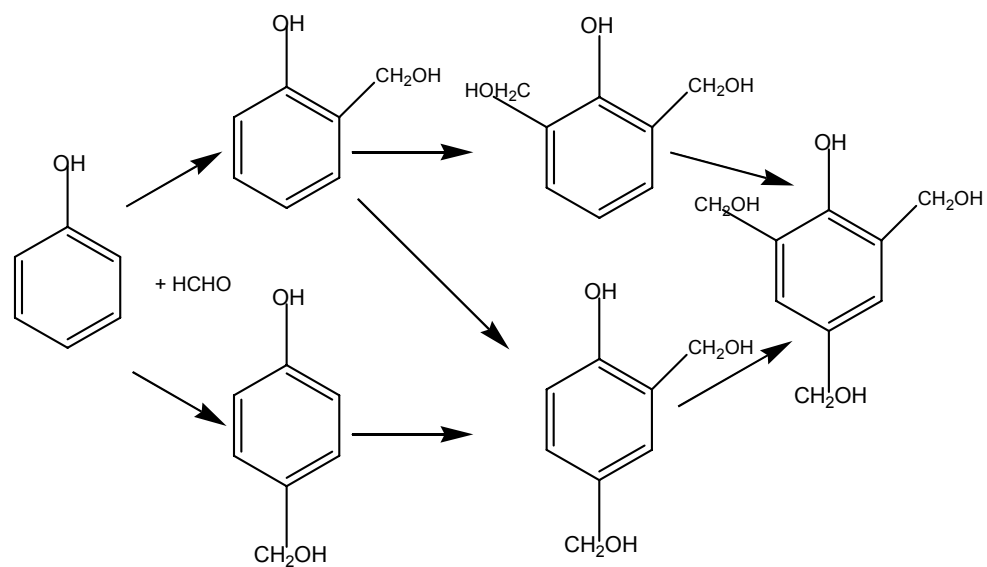


Figura 7. Formación del monómero.

4. El peso molecular se incrementa por condensación de los grupos metilol formando puentes metileno o puentes éter, como se muestra en la figura 8. En este último caso puede producirse una pérdida subsiguiente de formaldehído con formación de puentes metileno.

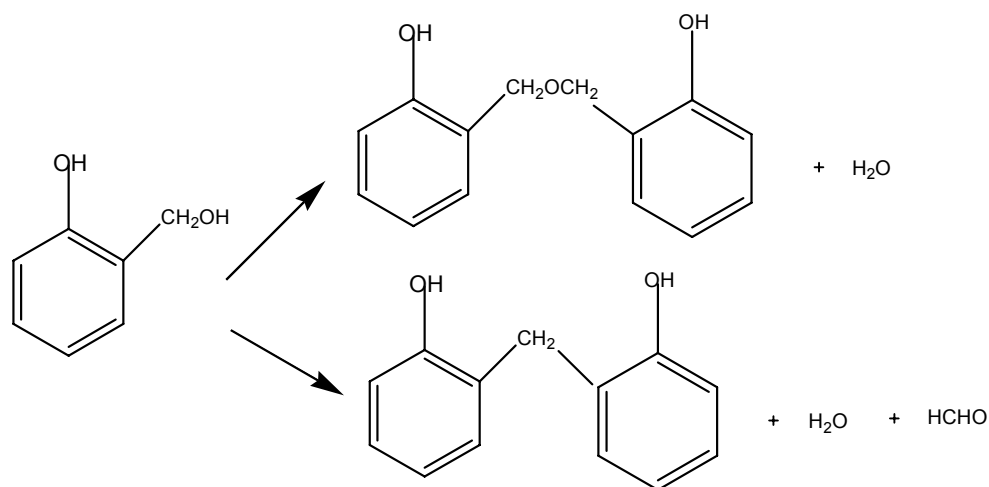


Figura 8. Incremento del peso molecular

5. Si estas reacciones continúan (catalizadas por calor o por adición de ácidos a temperatura ambiente) pueden condensar gran cantidad de núcleos fenólicos para dar lugar a la formación del retículo (figura 9).

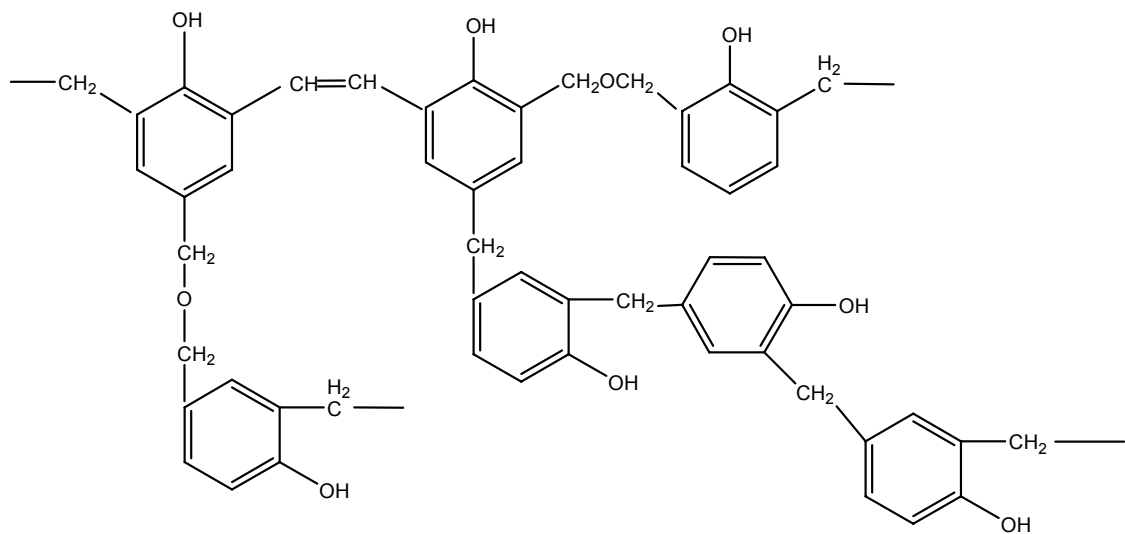


Figura 9. Formación del retículo

6. Durante el entrecruzamiento pasa por tres estados:

- Líquido, fusible y soluble
- Intermedio (resitol), prácticamente infusible, pero moldeable por efecto del calor, se hincha con algunos disolventes y posee baja resistencia mecánica.
- Estado final, infusible, insoluble y con alta resistencia mecánica.

2.10.3.4 Propiedades. En la producción comercial, la reacción se lleva hasta un punto predeterminado, se remueve la resina del reactor y se enfría para retardar la reacción, los resoles pueden ser líquidos o de varios grados de viscosidad de acuerdo a la formulación utilizada. En la tabla 3 se observan datos de las principales propiedades de las resinas sólidas y líquidas.

Estabilidad. Los resoles no son estables, ya que la reacción tiende a continuar hasta que la resina no es trabajable. Puede ser cuestión de horas o meses, dependiendo de la formulación utilizada y la temperatura de almacenamiento. En el punto de gel la resina llega a ser muy espesa y dura para ser trabajable, pero aún no ha llegado a su estado final.

RESINAS LÍQUIDAS	
Color	Rojizo oscuro
Gravedad específica	1.15-1.30
pH	6-10
Viscosidad (centipoises)	35-5000
Tolerancia al agua	Ninguna a infinito
No volátiles (%)	55-75
Tiempo de cura 150°C, plato caliente, segundos	30-720
Fenol libre (%)	5-20
Formaldehído libre (%)	2-5
RESINAS SÓLIDAS	
Color	Café a rojizo oscuro
Flujo en plato inclinado (mm)	5-150
Tiempo de cura 150°C, plato caliente, segundos	35-360
Fenol libre	5-15

Tabla 3. Propiedades de los resoles

Curado. El curado final de un resol puede realizarse aumentando la temperatura, cambiando el pH o ambos. Los catalizadores, si se desea, pueden adicionarse para agilizar la reacción. La reacción de los resoles es exotérmica y la acumulación de calor en un resol líquido almacenado, ha causado el endurecimiento en poco tiempo¹⁷.

2.11 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS

La caracterización de materiales poliméricos se realiza principalmente mediante ensayos de resistencia mecánica, técnicas instrumentales y por la medición de sus propiedades físicas y químicas.

2.11.1 Ensayos físicos para evaluar la resistencia de materiales

2.11.1.1 Compresión. Se produce cuando la viga es sometida a una fuerza o carga en sentido axial o perpendicular, de acuerdo con la posición de la misma (Figura 10). La resistencia a la compresión se expresa como deformación unitaria vs esfuerzo.

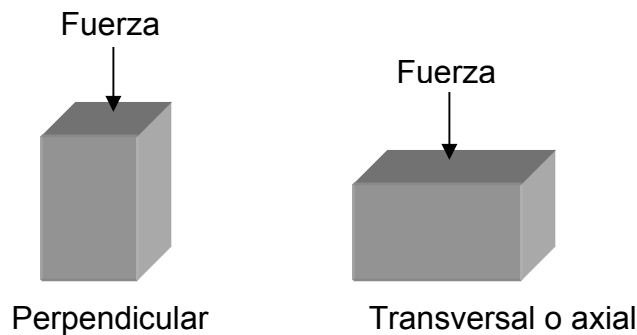


Figura 10. Resistencia a la compresión

La forma de la grafica indica si el material es dúctil o frágil:

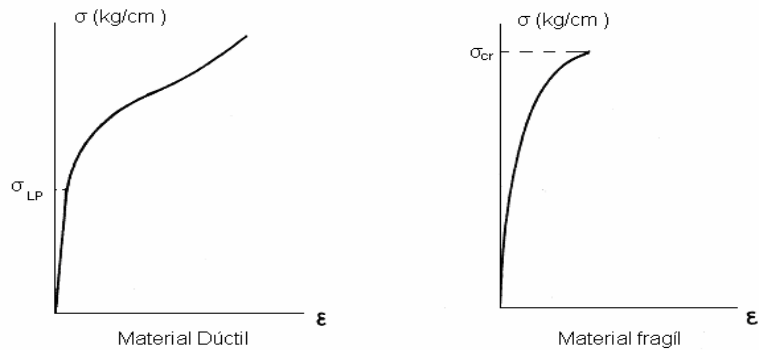


Figura 11. Graficas para materiales dúctiles y frágiles

En el eje y se tienen valores de esfuerzo (σ), este dato es tomado en diferentes instantes durante el ensayo

$$\sigma = P / A_i$$

Donde,

P = fuerza aplicada o carga (Kg.-f o lb.-f)

A_i = área inicial: área de la sección perpendicular o transversal de la viga antes de cargar la probeta (cm^2 o in^2).

En el eje x, aparecen datos de deformación unitaria (ξ)

$$\xi = \delta / L_i$$

Donde,

δ = Acortamiento de la probeta: medida de desplazamiento tomada en el deformímetro o extensómetro.

L_i = Longitud inicial: medida antes de aplicar la carga.

En la práctica los diagramas $\sigma - \epsilon$ realmente se dividen en tres tipos como se observa en la figura 12:

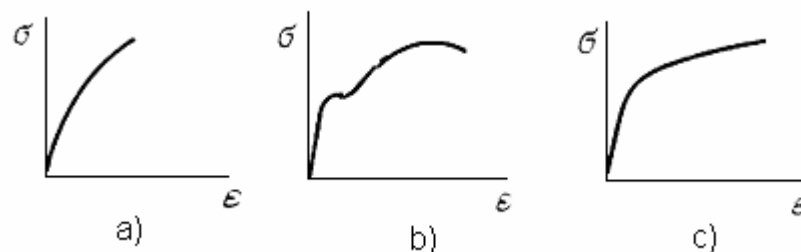


Figura 12. Diagramas reales de $\sigma - \epsilon$

- a) Característico para materiales frágiles.
- b) Característico para materiales muy plásticos.
- c) Característico para aceros de pequeña y mediana plasticidad.

Resistencia máxima a la rotura: Con este ensayo se calculan la resistencia máxima a la rotura (σ_{\max}) y el modulo de elasticidad o modulo de Young (E) aplicando las siguientes ecuaciones

$$\sigma_{\max} = P_{\max} / A_i$$

Donde, P_{\max} = Carga en la cual la probeta falló

$$E = (P_{LP} \cdot L_i) / A_i \cdot \delta_{LP}$$

Donde, el subíndice LP indica el valor de este dato en el límite de proporcionalidad, este es el punto donde termina la proporcionalidad entre esfuerzo y deformación¹⁸.

2.11.1.2 Flexión. Es el efecto o deformación que sufre una viga bajo carga transversal.

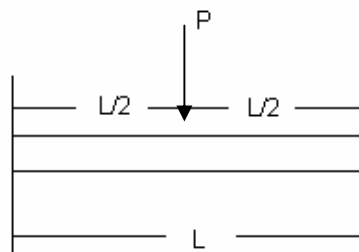


Figura 13. Modelo empleado para el esfuerzo flector

Donde,

P = carga constante concentrada en el centro de la viga (Kg.-f)

L = longitud de la viga (cm)

Y = deflexión o deformación de la viga en un punto x, entre $x = 0$ y $x = L$

2.11.1.3 Tracción. Se da cuando dos fuerzas de sentido contrario tienden a romper la viga, alargando su longitud y reduciendo su sección transversal (Figura 14). Se emplea la misma formula que para la compresión.

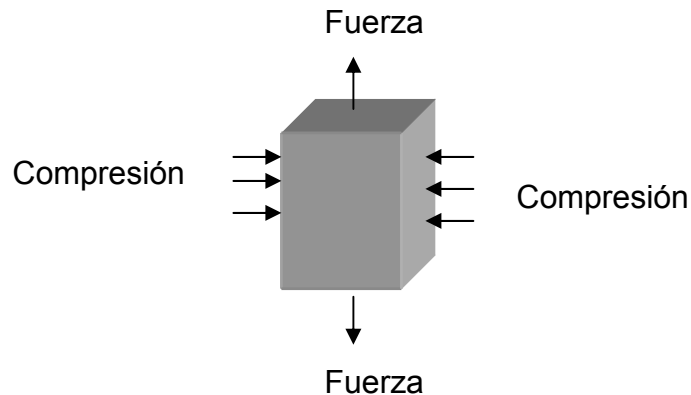


Figura 14. Resistencia a la tracción

2.11.1.4 Impacto. El ensayo de impacto que más se utiliza para materiales plásticos es el ensayo de muesca de Izod. En este ensayo se usa una probeta de muestra de $1/8 \times 1/2 \times 2 1/2$ pulgadas que se sujeta a la base de una maquina de ensayo de péndulo.

La cantidad de energía absorbida por la unidad de longitud de la muesca cuando el péndulo golpea la muestra es medida y denominada resistencia al impacto de la muesca del material. Esta medida se da generalmente en pies libra por pulgada (ft-lb/in) o Julio por metro (J/m)^{19,20}.

2.11.2 Propiedades físicas y químicas

2.11.2.1 Densidad aparente. Relación existente entre la masa del material y el volumen que ocupa, incluyendo todos los poros saturables y no saturables.

Según la norma ASTM D-792²¹ la densidad se calcula por desplazamiento, empleando el principio de Arquímedes: *todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical de igual magnitud pero de sentido opuesto al peso del fluido que desaloja dicho cuerpo (Figura 15).*

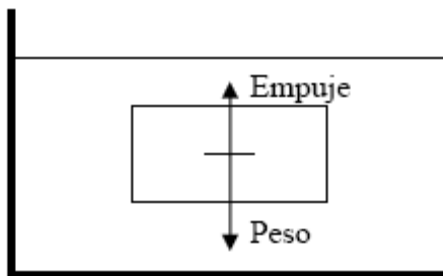


Figura 15. Principio de Arquímedes

El volumen del sólido sumergido puede escribirse como $V_{sol} = m_{sol} / \rho_{sol}$, siendo ρ_{sol} la densidad y m_{sol} la masa del cuerpo. El empuje E que actúa sobre el cuerpo vendrá dado por:

$$E = V_{sol} \rho_{liq} g = \frac{\rho_{liq}}{\rho_{sol}} m_{sol} g$$

donde ρ_{liq} es la densidad del líquido y g la aceleración de la gravedad.

La densidad se calcula teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$ds = \frac{w_s}{V} = \frac{w_s}{(w_T - w_b)} d_L$$

Donde,

d_s = densidad del sólido

w_s = peso del sólido

w_T = peso del sistema (vaso+líquido+sólido)

w_b = peso del vaso+líquido

d_L = 0.9975g/mL si el líquido es agua

2.11.2.2 Porosidad y absorción. La porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro del material. Según la norma ASTM D-570²² se calcula el porcentaje de absorción de agua en 24 horas:

$$\% \text{Absorción de agua} = \frac{\text{peso humedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} * 100$$

2.11.2.3 Resistencia a reactivos químicos. Se expresa con relación a la solubilidad que presenta el material y su reacción con ácidos y bases.

La resistencia química reporta cambios de peso, dimensiones, apariencia y propiedades. Estos aspectos dependen de la concentración de los reactivos, el tiempo de inmersión y la temperatura del ensayo.

2.11.3 Técnicas instrumentales

Dentro de las técnicas instrumentales la más utilizada es la espectroscopia de infrarrojo.

2.11.3.1 Espectroscopia de Infrarrojo. Como se sabe, las moléculas poliméricas consisten de cadenas largas de unidades químicas estructurales, cada una de las cuales tiene la misma estructura llamada *unidad repetitiva*. Por ejemplo, el polietileno es una cadena de unidades repetitivas de CH₂. Una característica que define las moléculas poliméricas es su alto peso molecular.

En general el espectro infrarrojo no responde a cambios en el peso molecular de una muestra. El espectro de un grupo metileno es el mismo si el metileno es parte de una molécula de hexano con un peso molecular de 86 o parte de una cadena de polietileno con un peso molecular de 100000.

El espectro infrarrojo puede revelar la estructura de una unidad polimérica repetitiva, pero tiene poco que decir acerca de su peso molecular. Para el caso el de los polímeros, debido a su estructura compleja se estudian los espectros infrarrojos como huellas dactilares del conjunto de la estructura. El espectro infrarrojo para el policarbonato presenta dos bandas características que corresponden a la tensión del grupo carbonilo en 1777cm^{-1} y la tensión C-O en 1230cm^{-1} .

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental desarrollado se inició con la molienda de los discos compactos para facilitar la disolución, seguido por la selección de un solvente que permitiera extraer el polímero y realizar una dispersión homogénea del material. Con esta dispersión se tomaron dos caminos: uno fue la extracción del policarbonato y el otro, la incorporación a una resina fenol formaldehído con el fin de modificar sus propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas. Finalmente, se realizó la caracterización de los productos obtenidos. En general, el desarrollo experimental se muestra en la figura 16.

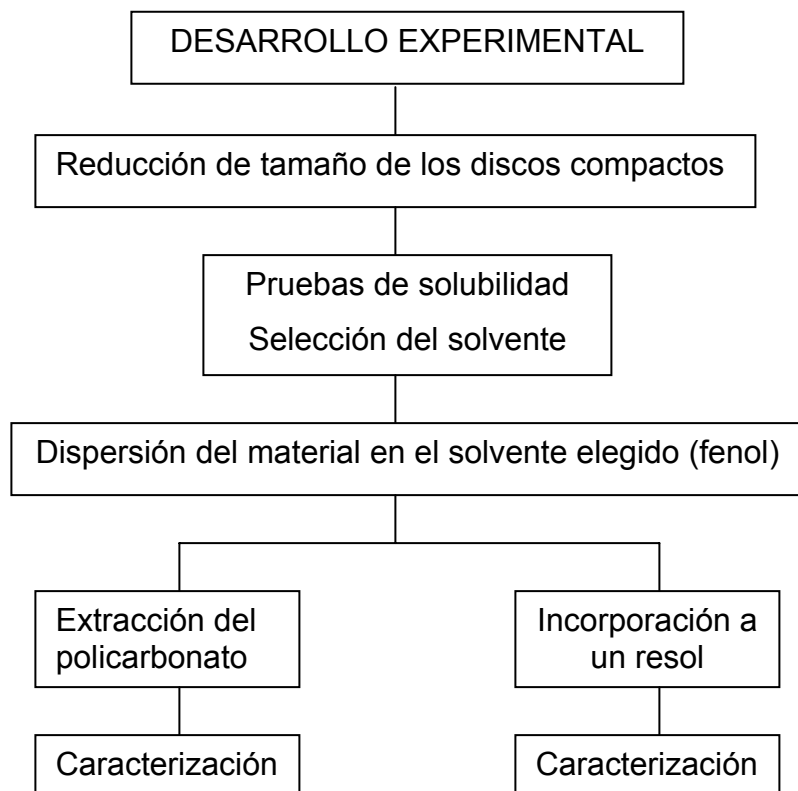


Figura 16. Diagrama del diseño experimental

3.1 REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE LOS DISCOS COMPACTOS

Se utilizaron discos compactos recuperados antes de ser desechados, los cuales se partieron manualmente en cuatro partes y por ultimo se trituraron en el molino de cuchillas Standard Model No. 3 Wiley Mill (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.

El objetivo de esta molienda fue facilitar la disolución del material.

3.2 PRUEBAS DE SOLUBILIDAD

Se realizaron pruebas empleando 20 mg/mL a temperatura ambiente (25°C) durante 24 horas con los siguientes solventes orgánicos:

- Acetona comercial
- Ácido acético glacial
- Ácido sulfúrico al 98%
- Benceno 99%
- Cloroformo 99%
- Diclorometano 99%
- Etanol comercial
- Fenol 99%
- Formaldehído al 37%
- Tetracloruro de carbono
- Tolueno 99%
- Xileno 98%

3.3 SELECCIÓN DEL SOLVENTE

Se evaluaron solventes comúnmente empleados tanto en la industria como en el trabajo de laboratorio. Entre los que se comportaron como solventes del policarbonato (presente en discos compactos) se seleccionó al fenol por que permite obtener dispersiones homogéneas y a diferencia de los compuestos

organoclorados el impacto ambiental que ocasiona puede ser controlado por diversos métodos fisicoquímicos y biológicos. Además permite separar la capa metálica que queda en el fondo del recipiente en el cual se realiza la dispersión y es reactivo para el proceso de incorporación al resol.

3.4 DISPERSIÓN DEL MATERIAL EN FENOL

Se adicionaron discos compactos triturados a 100g de fenol en un vaso de precipitados, el cual se sometió a calentamiento aumentando la temperatura hasta 150°C y saturando la solución, obteniendo una dispersión homogénea fenol –policarbonato y un precipitado correspondiente a la capa metálica.

La mezcla saturada se consigue al adicionar 216g de CD's de lo cual se obtiene una dispersión CD's-fenol del 68.35%p/p. Al enfriar a temperatura ambiente se obtuvo una pasta dura color beige la cual se pulverizó empleando un mortero.

3.5 EXTRACCIÓN DEL POLICARBONATO

El fenol es un compuesto ligeramente soluble en agua y muy soluble en alcohol etílico, esta solubilidad se aprovechó para eliminarlo junto con los colorantes mediante una extracción Soxhlet, realizando el montaje que se muestra en la figura 17.

Este método se emplea cuando la muestra que contiene el componente deseado se encuentra en estado sólido, se sigue el siguiente procedimiento:

- La muestra se coloca en el dedal o recipiente para extracción (poroso).
- El solvente empieza a calentarse hasta alcanzar su punto de ebullición.

- Los vapores ascienden por el condensador y caen en forma líquida sobre la muestra llenando el dedal.
- Una vez el dedal se llena (y por efecto de sifón), el solvente y el extracto se descargan al balón para continuar con la ebullición y repetir el proceso.
- Sucesivas descargas del solvente aseguran mayor extracción.



Figura 17. Extracción Soxhlet

Después de 36 horas de extracción, se secó el policarbonato presente en el saco a 100°C durante 24 horas con el fin de eliminar el etanol absorbido. El procedimiento descrito anteriormente se realizó por triplicado.

La recuperación de los solventes se realizó mediante destilación, inicialmente a 80°C para recoger el etanol y posteriormente a 190°C para el fenol.

3.6 CARACTERIZACIÓN DEL POLICARBONATO

El policarbonato obtenido se caracterizó por espectroscopía Infrarroja (IR) y pruebas físicas y químicas como resistencia a reactivos químicos, densidad, punto de fusión y resistencia a la tracción. Estas pruebas se realizaron de acuerdo con las normas ASTM.

3.6.1 Espectroscopía Infrarroja

Se realizaron pastillas con Bromuro de potasio (KBr) para efectuar un Análisis de espectroscopía Infrarroja en el equipo Bruker, modelo Tensor 27 presente en el laboratorio de Instrumentación Química Especial (CT. 318).

3.6.2 Resistencia a reactivos químicos

Para determinar la resistencia del PC a reactivos químicos se introdujo entre 0.3 y 0.6 g del material moldeado en 10 mL del reactivo a temperatura ambiente (25°C) durante 7 días agitando cada 24 horas. Las observaciones realizadas fueron las sugeridas por la norma ASTM D-543²³: cambios de peso, apariencia y propiedades, como pérdida de brillo, descomposición, decoloración, hinchamiento, nublamiento, elasticidad (engomamiento), formación de burbujas, solubilidad y agrietamiento.

3.6.3 Densidad Aparente

Se pesó un vaso de precipitados parcialmente lleno de agua, luego se ató la barra de PC con un hilo delgado de cobre y se suspendió en el recipiente con agua, sin que el sólido tocara las paredes del vaso, finalmente se pesó todo el sistema. Con estos datos se calculó la densidad empleando la fórmula descrita en la sección 2.11.2.1.

3.6.4 Punto de fusión

Para observar la temperatura de fusión se colocó una pequeña cantidad de PC pulverizado en un fusiómetro Fisher Scientific (Figura 18) ubicado en el Laboratorio de Fisicoquímica, esta prueba se hizo por triplicado.



Figura18. Fusiómetro Fisher Scientific

3.6.5 Absorción de agua en 24 horas

Este ensayo se realizó con trozos moldeados de policarbonato inicialmente pesados, colocando cada uno en 10 mL de agua destilada y conservándolo sumergido por 24 horas a temperatura ambiente. Pasado este tiempo se retiró la muestra, se secó con un paño y se pesó inmediatamente.

3.7 INCORPORACIÓN DEL POLICARBONATO A UN RESOL

La incorporación del policarbonato a la bakelita se realizó mezclando la dispersión CD's-fenol con el resol antes de realizar el curado.

3.7.1 Síntesis del resol

Se empleó fenol puro en estado sólido, formaldehído al 36,5% y soda cáustica en hojuelas como iniciador. Los reactivos fueron adicionados en las siguientes proporciones: 1:1.5 molar fenol-formaldehído, 0.5-1% p/p de hidróxido de sodio respecto a la carga de fenol y previamente disuelto en agua destilada.

En un balón de 250mL con un condensador a reflujo, agitador magnético y termómetro se agregaron 0.57 moles (50mL, 53.55g) de fenol puro en estado sólido, 0.855 moles (64mL, 69.325g) de formaldehído al 36.5% y entre 0.25-0.3g de NaOH disuelto en 10mL de agua destilada. El montaje realizado se muestra en la figura 19.



Figura 19. Reflujo de la mezcla de reacción.

La mezcla de reacción se agitó a 150 rpm y se calentó a $85\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante dos horas. Pasado este tiempo, se detuvo el reflujo.

Se agregó 5mL de ácido sulfúrico 0.5M para reducir el pH a un intervalo entre 5 y 6. Posteriormente se realizó la eliminación de agua mediante destilación simple a $80\pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.7.2 Modificación del resol

Se saturó el resol con la pasta fenol-CD's pulverizada, obteniéndose una mezcla del 65%p/p a la cual se le realizó el curado en un molde prensado con tornillos que se llevó a la estufa a 100°C por 60 horas, utilizando aceite de parafina como desmoldante.

El tiempo de curado disminuye considerablemente (aproximadamente un 50%) utilizando moldes metálicos, en este caso se emplearon moldes de madera cubiertos con cobre por ser mas económicos.

3.8 CARACTERIZACIÓN DEL RESOL MODIFICADO

El resol modificado se caracterizó mediante comparación con el resol no modificado (sin policarbonato), realizando mediciones de algunas de sus propiedades físicas y químicas como punto de fusión, densidad aparente, resistencia a ácidos y absorción de agua en 24 horas. Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión, con el cual se calculó la resistencia máxima a la rotura y el módulo de elasticidad.

El punto de fusión, densidad, resistencia a ácidos y absorción de agua se realizaron siguiendo el procedimiento descrito para la caracterización del policarbonato.

La resistencia a la compresión se realizó en la Máquina Universal de ensayos marca AMSLER con capacidad máxima de 4 toneladas (figura 20).

Se ensayaron tres probetas, cada una de dimensiones 2x2x3.5 cm. A cada una se le realizó el siguiente procedimiento:

- Se colocó la muestra en la maquina como se observa en la imagen inferior derecha de la figura 20.
- Se aplicó progresivamente la carga hasta que se produjo la falla.
- Se tomaron datos de deformación (en milésimas de pulgadas) cada 20 kg/cm² de carga aplicada



Figura 20. Máquina Universal de ensayos

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 PRUEBAS DE SOLUBILIDAD DE LOS DISCOS COMPACTOS

Se evaluaron solventes comúnmente empleados tanto en la industria como en el trabajo de laboratorio mostrados en la tabla 4.

SOLVENTE	COMPORTAMIENTO
Acetona comercial	Parcialmente soluble
Ácido acético glacial	Parcialmente soluble
Ácido sulfúrico al 98%	Insoluble
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

Tabla 4. Resultados de ensayos preliminares de solubilidad de los CD's

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, tolueno y xileno) se detengan en la primera fase.

La solubilidad del policarbonato en solventes clorados se debe a que es un aceptor de protones débil, por 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 cristalinos²⁴.

4.2 EXTRACCIÓN DEL POLICABONATO

Para confirmar que se llevó a cabo la extracción completa del fenol se realizaron los siguientes ensayos cualitativos a una pequeña cantidad de líquido extraído del soxhlet:

- Ensayo con cloruro férrico. Este compuesto en presencia de fenoles da coloración azul. Al agregar tres gotas de cloruro férrico al 2,5% al líquido, la solución se tornó lechosa, por tanto la prueba es negativa.

- Ensayo con cloranil (tetracloroquinona) en dioxano: Al igual que el ensayo con cloruro férrico, se presentó turbidez, dando resultado negativo, ya que este compuesto en presencia de fenoles produce coloraciones amarillas, anaranjadas y rojas.

La turbidez observada en ambos casos se debe a la presencia de un policarbonato de menor peso molecular que el policarbonato de bisfenol-A comúnmente empleado como plastificante.

Al terminar con la extracción, el policarbonato se secó en la estufa durante 24 horas a una temperatura de 100°C y se pesó. La mezcla de solventes se destiló con el fin de recuperar el fenol y el etanol empleados en el proceso. Los porcentajes de recuperación, obtenidos para el policarbonato, etanol y fenol se muestran en la tabla 5.

COMPUESTO	PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN
PC	89.32 %
Etanol	73.33 %
Fenol	70.78 %

Tabla 5. Porcentajes de recuperación después de la extracción Soxhlet

Según la literatura (sección 2.8) los discos compactos tienen aproximadamente 90% de policarbonato, con este procedimiento se recupera el 89,32%. Las pérdidas son poco significativas teniendo en cuenta que no todos los discos tienen exactamente el mismo contenido de policarbonato.

Las pérdidas de los solventes se deben a volatilización durante los procesos realizados y a pérdidas de muestra durante la manipulación. Los porcentajes de recuperación del etanol y fenol muestran que es posible realizar el proceso a

escala industrial con recirculación de solventes garantizando un proceso económico y alternativo.

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL POLICARBONATO EXTRAÍDO



Figura 21. Policarbonato extraído

4.3.1 Espectro Infrarrojo

El espectro obtenido (Figura 22) es afín con el reportado en la base de datos Sadtler No 869K, posee las bandas características para cada grupo funcional de la molécula de policarbonato de bisfenol A (ver figura 1), los cuales se reportan en la tabla 6.

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 esteres (dos bandas)	1192.50, 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

Tabla 6. Señales de espectroscopia IR para el policarbonato

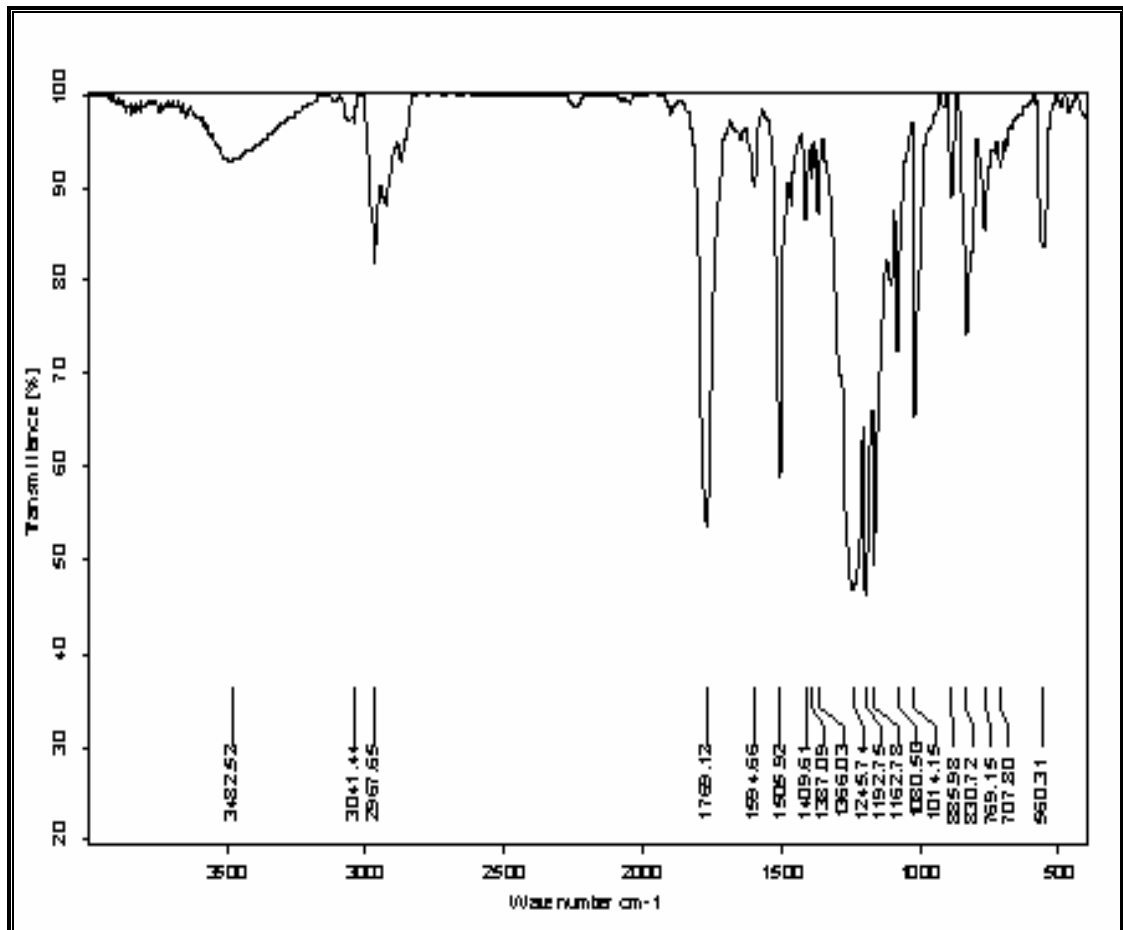


Figura 22. Espectro IR tomado al policarbonato extraído

Se puede observar en el espectro que el policarbonato extraído, no presenta ningún cambio en su estructura, detectado al IR, ocasionado por el tratamiento químico al cual se sometieron los discos compactos.

4.3.2 Resistencia a reactivos químicos

Este ensayo se realizó con ácidos y bases (débiles y fuertes) para determinar la resistencia del material en contacto con agentes químicos.

El comportamiento del PC frente a diversos ácidos y bases se muestra en las tablas 7 y 8 respectivamente.

ÁCIDO	RESISTENTE	OBSERVACIÓN
Ácido acético glacial	Si	Conservó el brillo y la apariencia
Ácido clorhídrico 37%	Si	Conservó el brillo y la apariencia
Ácido fórmico 98%	Si	Conservó el brillo y la apariencia
Ácido fosfórico 85%	Si	Conservó el brillo y la apariencia
Ácido sulfúrico 70%	No	Engomamiento, pérdida de brillo

Tabla 7. Resistencia a ácidos del policarbonato obtenido

La reacción con el ácido sulfúrico se observó en el primer día del test, con la coloración rosa de la solución, día a día se fue oscureciendo, el material se hinchó, engomó, perdió el brillo y la transparencia que lo caracteriza.

En presencia de los demás ácidos, no se observó variación en las propiedades del material, lo que muestra que el PC obtenido presenta buena resistencia ante ácidos débiles y fuertes exceptuando el ácido sulfúrico.

BASE	RESISTENTE	OBSERVACIÓN
Hidróxido de amonio al 32%	No	Lo destruyó
Hidróxido de potasio al 10%	Si	Conservó el brillo y la apariencia
Hidróxido de sodio al 10%	Si	Conservó el brillo y la apariencia
Hipoclorito de sodio al 5.25%	Si	Conservó el brillo y la apariencia

Tabla 8. Resistencia a bases del policarbonato obtenido

El policarbonato se destruye en presencia de soluciones amoniacaes y bases fuertes a altas concentraciones, debido a la hidrólisis de los grupos éster-carbonato (Figura 23).

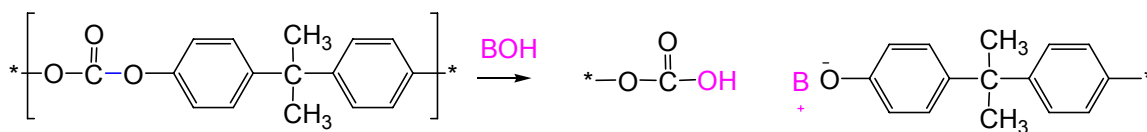


Figura 23. Destrucción del policarbonato en bases fuertes

A concentraciones bajas, el policarbonato es resistente al ataque básico, esto representa una gran aplicación del policarbonato en la industria de la construcción, especialmente en baldosas, ya que las bases comerciales empleadas en los productos de limpieza son de baja concentración y no afectan la estructura del material.

4.3.3 Densidad aparente

La densidad calculada, empleando la fórmula descrita en la sección 2.11.2.1, para el policarbonato fue de $1.18 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ (ver tabla 9). Este dato se obtuvo a una temperatura de 25°C y concuerda con el dato reportado por la literatura para el policarbonato de bisfenol-A (anexo A) cuyo valor es de 1.2 g/cm^3 .

MUESTRA	PESO SÓLIDO: $w_s(\text{g})$	PESO VASO+ LÍQUIDO: $w_b(\text{g})$	PESO DEL SISTEMA: $w_T(\text{g})$	DENSIDAD (g/cm^3)	DESVIACIÓN: d_i
PC-1	1.40	207.15	208.30	1.21	0.03
PC-2	0.90	206.85	207.65	1.12	-0.06
PC-3	1.62	206.70	208.05	1.20	0.02
Promedio				1.18	0.03

Tabla 9. Densidad del policarbonato extraído

4.3.4 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.

El rango de temperatura de fusión calculado para el PC fue 244-247°C (tabla 10), similar al rango reportado en la literatura: 245-250°C (anexo A)

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

Tabla 10. Temperatura de fusión del policarbonato extraído

La existencia de un rango de fusión se debe a la naturaleza macromolecular de los polímeros y la existencia de defectos en la regularidad estructural ya que no todas las cadenas tienen la misma longitud ni terminan en la misma posición.

4.3.5 Absorción de agua en 24 horas

La absorción de agua del policarbonato es mínima, el valor reportado en la literatura (anexo A) es 0.1%, para detectarla fue necesario emplear en este análisis una balanza de precisión 0.0001g.

MUESTRA	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	% DE ABSORCIÓN	DESVIACIÓN
PC-1	0.1301	0.1303	0.1537	0.0264
PC-2	0.1572	0.1573	0.0636	-0.0637
PC-3	0.1824	0.1827	0.1645	0.0381
Promedio			0.1273	0.0427

Tabla 11. Absorción de agua en 24 horas para el PC extraído

El porcentaje de absorción de agua para el policarbonato se calculó empleando la fórmula que se indica en la sección 2.11.2.2, obteniendo un valor de 0.1273 ± 0.0427 % (ver tabla 11). Su bajo nivel de absorción de agua contribuye a su estabilidad dimensional y no origina ningún efecto plastificante.

Los resultados de estos ensayos, resumidos en la tabla 12, son los esperados para el policarbonato, lo cual permite confirmar que el producto extraído corresponde al policarbonato de bisfenol-A presente en los discos compactos.

PROPIEDAD	VALOR EXPERIMENTAL	VALOR DE LITERATURA
Densidad (g/cm^3)	1.18 ± 0.03	1.20
Punto de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	244-247	245-250
Absorción de agua	0.1273 ± 0.0424	0.1

Tabla 12. Comparación de datos experimentales y de literatura para el policarbonato.

4.4 CARACTERIZACIÓN DEL RESOL MODIFICADO CON PC

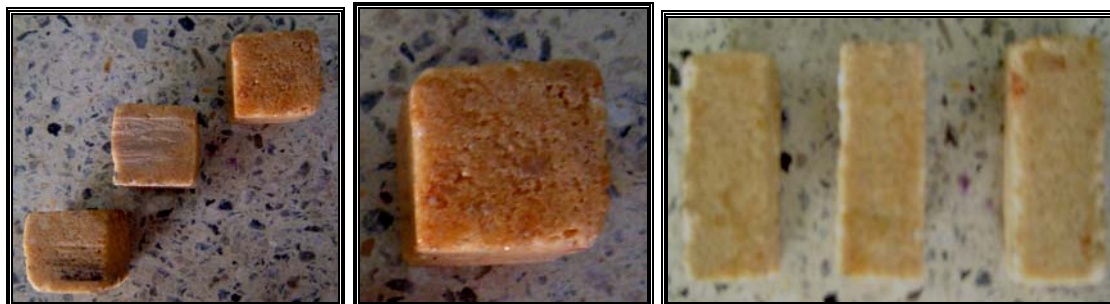


Figura 24. Resol modificado con policarbonato

La caracterización del resol modificado, por adición de policarbonato, se realizó por comparación de sus propiedades con las del resol sin modificar.

4.4.1 Resistencia a la compresión

- Para el resol modificado se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 13, los cuales se emplearon para realizar la gráfica 25

:

Deformación unitaria: ϵ	Esfuerzo: σ (kg/cm²)
0,0009	5,3763
0,0012	10,7527
0,0019	16,1290
0,0027	21,5054
0,0050	26,8817
0,0080	32,2581
0,0100	37,6344
0,0120	43,0108
0,0140	48,3871
0,0157	53,7634
0,0177	59,1398
0,0193	64,5161
0,0213	69,8925
0,0233	75,2688
0,0253	80,6452
0,0280	86,0215
0,0300	91,3978
0,0333	96,7742
0,0413	99,4624

Tabla 13. Datos para el gráfico Deformación unitaria vs. Esfuerzo del resol-PC

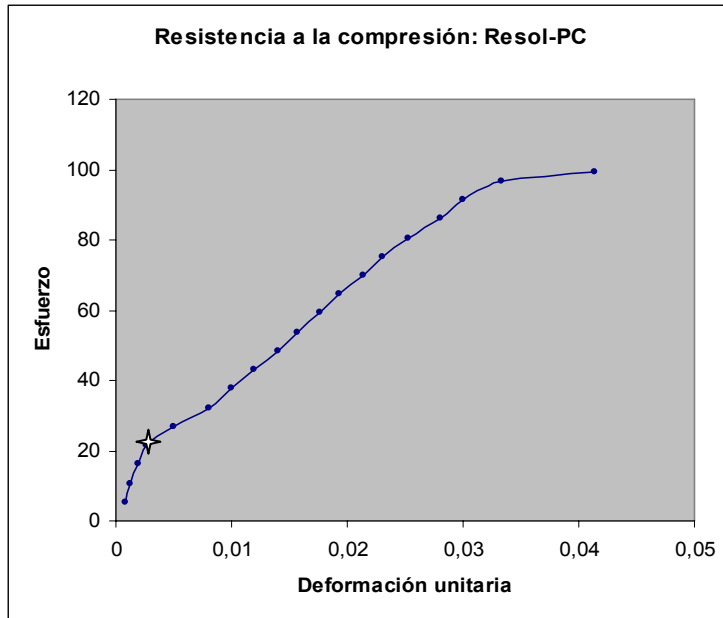


Figura 25. Gráfica de Deformación unitaria vs. Esfuerzo para el resol modificado

- Para el resol sin modificar se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 14, los cuales se emplearon para realizar la gráfica 26.

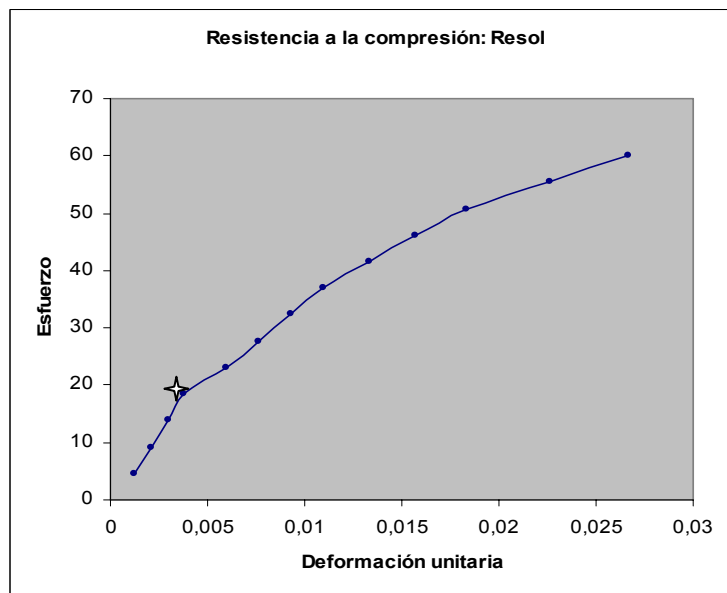


Figura 26. Gráfica de Deformación unitaria vs. Esfuerzo para el resol

Deformación unitaria: ϵ	Esfuerzo: σ (kg/cm²)
0,0012	4,6189
0,0021	9,2379
0,0030	13,8568
0,0037	18,4757
0,0060	23,0947
0,0077	27,7136
0,0093	32,3326
0,0110	36,9515
0,0133	41,5704
0,0157	46,1894
0,0183	50,8083
0,0227	55,4273

Tabla 14. Datos para el gráfico Deformación unitaria vs. Esfuerzo del resol

Las graficas presentan un comportamiento similar al descrito en la figura 12.b, característico para materiales tenaces, mostrando elasticidad para esfuerzos menores al punto de fluencia (señalado con ↗) y por encima de este un comportamiento plástico.

Se denomina punto de fluencia, punto de cadencia o limite elástico al máximo esfuerzo que el material puede soportar sin deformarse permanentemente²⁵.

El Resol-PC presenta mayor resistencia a la compresión, a la rotura y módulo de elasticidad que el resol sin modificar (ver tabla 15), lo que indica que la incorporación del policarbonato aumenta la resistencia mecánica de la resina fenol-formaldehído.

VARIABLE	RESOL-PC	RESOL
Carga máxima: P_{\max} (kg-f)	370	270
Área inicial: A_i (cm ²)	4.33	3.72
Resistencia a la rotura (kg/cm²)	99.46	62.36
Carga en el LP: P_{LP} (kg-f)	80	80
Longitud inicial: L_i (cm)	3.81	3.82
Deformación en el LP: δ_{LP}	4.0×10^{-3}	5.6×10^{-3}
Módulo de elasticidad	1.76×10^4	1.47×10^4

Tabla 15. Resistencia a rotura y módulo de elasticidad para el Resol-PC y el Resol

Se puede demostrar, comparando los espectros IR, del policarbonato y del resol con el del resol modificado (ver figura 27), que hay formación de enlaces entre el policarbonato y el resol que hacen de la bakelita modificada un producto más estable con mejores propiedades mecánicas.

Las diferencias que indican la formación de enlace son, la desaparición de la banda del grupo carbonilo presente en el policarbonato en 1769.12cm^{-1} (línea roja) y la variación en la banda de los hidroxilo (línea azul). La posible estructura del compuesto formado por la mezcla resol-policarbonato se muestra en la figura 28.

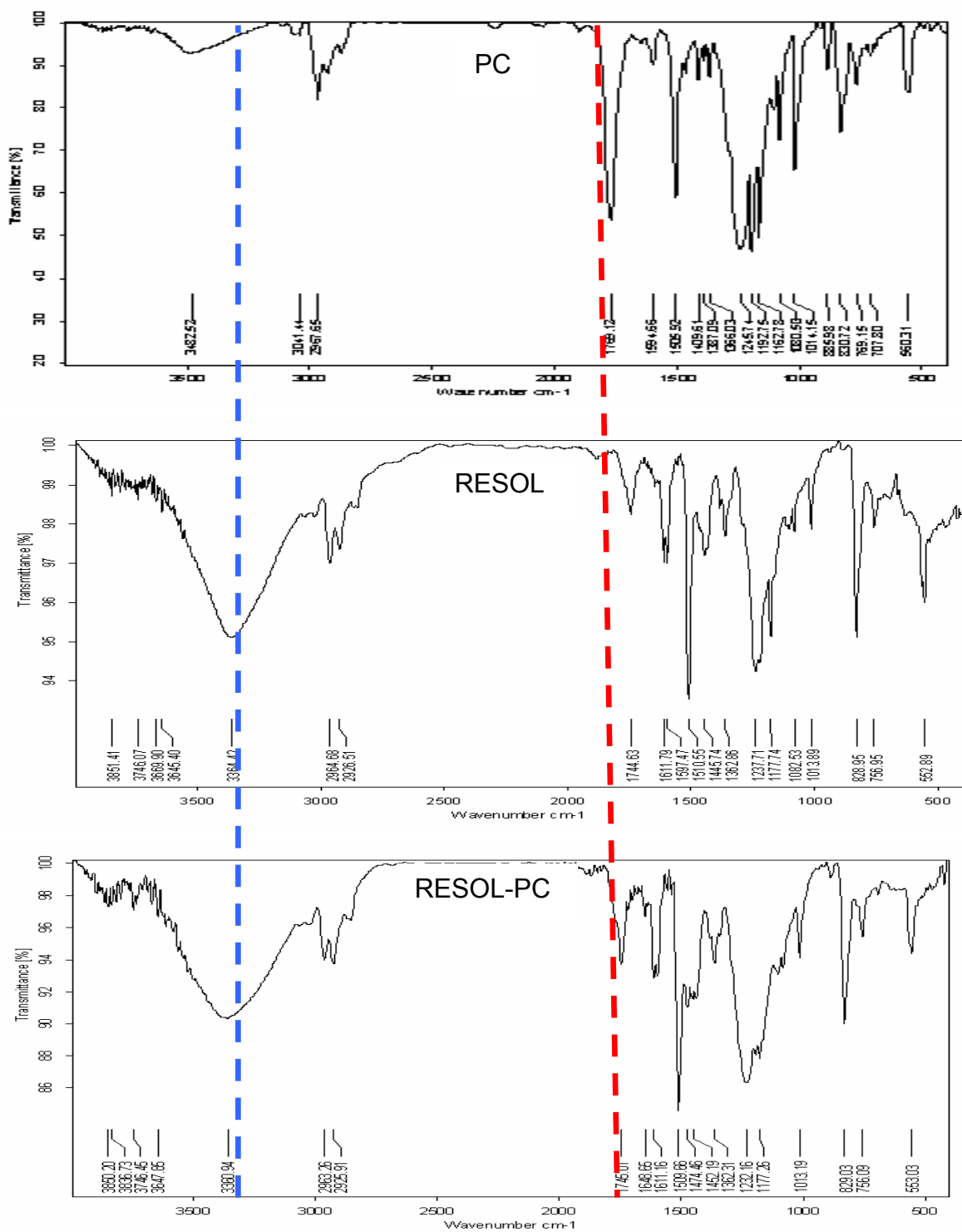


Figura 27. Comparación de espectros de infrarrojo del resol y PC

con el del resol modificado.

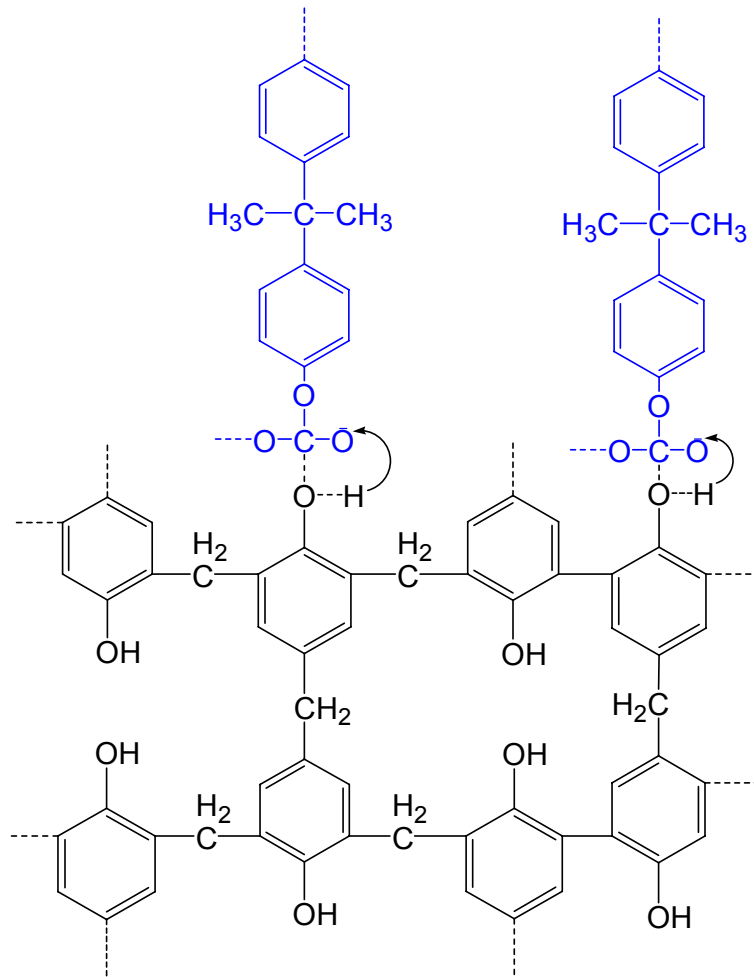


Figura 27. Posible estructura del resol-policarbonato.

4.4.2 Resistencia a ácidos y bases

De acuerdo con los cambios aparentes en textura, color, hinchamiento, cambio de viscosidad, se dice que si no hay variación en estos parámetros el material se considera resistente a la influencia del agente químico; de lo contrario su resistencia puede ser parcial o escasa.

La resistencia frente a ácidos y bases para el resol y el resol modificado se muestra en las tablas 16 y 17.

ÁCIDO	RESISTENCIA RESOL	RESISTENCIA RESOL-PC
Ácido acético glacial	Si	Si
Ácido clorhídrico 37%	Si	Si
Ácido fórmico 98%	Si	Si
Ácido fosfórico 85%	Si	Si
Ácido sulfúrico 70%	No	No

Tabla 16. Resistencia al ataque ácido del resol y resol-PC

BASE	RESISTENCIA RESOL	RESISTENCIA RESOL-PC
Hidróxido de amonio al 32%	Parcial	Parcial
Hidróxido de potasio al 10%	Parcial	Parcial
Hidróxido de sodio al 10%	No	No
Hipoclorito de sodio al 5.25%	No	No

Tabla 17. Resistencia al ataque básico del resol y resol-PC

Para el ácido sulfúrico la reacción es notable, se produce cambio de color, de textura, engomamiento y disgregación del material. Para el ácido clorhídrico aunque no hay disgregación del material, se observó cambio de color debido al fenol residual de las resinas obtenidas.

En los hidróxidos de amonio y potasio, la resistencia es parcial, se produce cambio de color pero no hay disgregación del material. En general, los resoles no son resistentes al ataque con bases fuertes debido a la reacción de estas con los grupos fenólicos formando iones fenóxido (figura 29). La adición del policarbonato al resol no mejoró la resistencia al ataque básico ya que en su estructura hay grupos hidroxilo sin reaccionar.

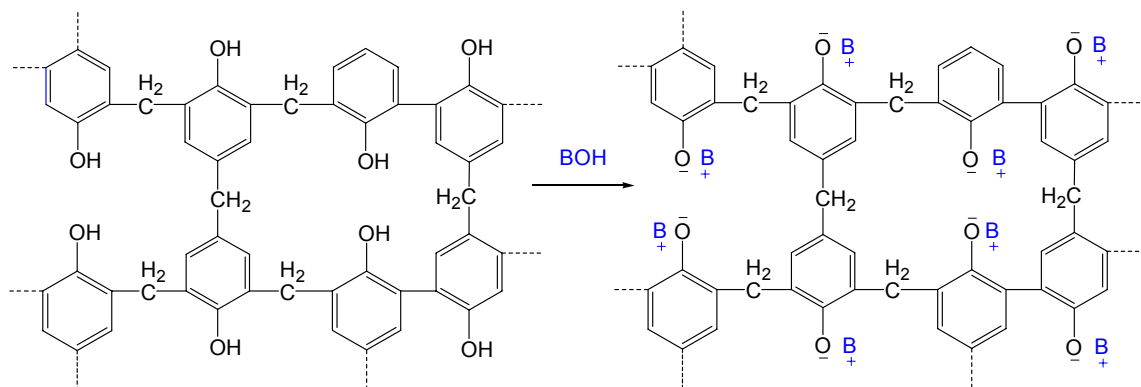


Figura 29. Ataque básico a un resol

4.4.3 Densidad

La densidad para el resol modificado $0.0858 \pm 0.027 \text{ g/cm}^3$ (tabla 18), se calculó empleando la fórmula descrita en la sección 2.11.2.1 a una temperatura de 25°C .

MUESTRA	PESO SÓLIDO: $w_s(\text{g})$	PESO VASO+ LÍQUIDO: $w_b(\text{g})$	PESO DEL SISTEMA: $w_T(\text{g})$	DENSIDAD (g/cm^3)	DESVIACIÓN: d_i
Resol-PC-1	1.98	206.90	209.10	0.898	0.040
Resol-PC-2	0.90	209.10	207.65	0.855	-0.003
Resol-PC-3	1.80	0.898	208.65	0.820	-0.038
Promedio				0.858	0.027

Tabla 18. Densidad del resol modificado

La densidad para el resol se realizó por duplicado pesando los cilindros y midiendo su volumen, los datos y resultados se muestran en la tabla 19:

El resol modificado es más liviano que el resol sin modificar, esta propiedad concedida por el policarbonato a la baquelita junto con su resistencia mecánica

hacen que este producto tenga gran aplicabilidad en los sectores de la construcción y la industria automotriz.

MUESTRA	VOLUMEN (cm ³)	PESO (g)	DENSIDAD (g/cm ³)	DESVIACIÓN
Resol-1	3.44	3.42	0.994	-0.031
Resol-2	2.66	2.48	0.931	0.032
Promedio			0.963	0.032

Tabla 19. Densidad del resol

4.4.4 Temperatura de descomposición

Las resinas fenol formaldehído por ser termoestables no presentan punto de fusión, al someterlas al calor su estructura se altera y sus enlaces se rompen. Se midió la temperatura de descomposición.

La temperatura de descomposición tanto para el resol modificado como para resol sin modificar es 250-253°C, por tanto la incorporación de policarbonato a la baquelita no afecta su resistencia térmica. Esto se debe posiblemente, a que aunque la molécula del resol modificado aumenta de tamaño, sus cadenas reticuladas son más cortas que las del resol sin policarbonato por tanto su peso molecular promedio no aumenta.

4.4.5 Absorción de agua en 24 horas

Los altos porcentajes de absorción obtenidos para ambos resoles se deben a la porosidad del material.

MUESTRA	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	% DE ABSORCIÓN	DESVIACIÓN
Resol-1	0.4602	0.4773	3.7158	-0.082
Resol-2	0.5593	0.5810	3.8798	0.082
Promedio para el Resol			3.7978	0.082
Resol-PC-1	0.2220	0.2297	3.4684	-0.1167
Resol-PC-2	0.1864	0.1933	3.7017	0.1166
Promedio para el Resol-PC			3.5851	0.1167

Tabla 20. Absorción del agua en 24 horas para el Resol-PC y el Resol

Aunque no se presentan grandes diferencias, el resol modificado absorbe menos agua, debido a la baja absorción del policarbonato, razón por la cual puede resistir mayor exposición a la humedad.

4.5 BALANCES DE MASA

Proceso 1: Dispersión del material en fenol



Figura 30. Balance de masa para la dispersión en fenol

En esta etapa no se presentaron pérdidas significativas, la temperatura del proceso fue inferior al punto de ebullición del fenol.

Proceso 2: Extracción Soxhlet y recuperación de solventes



Figura 31. Balance de masa de la extracción Soxhlet

El residuo 1 está constituido por los colorantes, plastificantes, fenol y etanol; el residuo 2, por fenol, colorantes y plastificantes.

Al aproximarse el sistema a los 100°C se eliminó una pequeña cantidad de agua presente en el etanol ingresado al sistema.

Proceso 3: Síntesis del resol

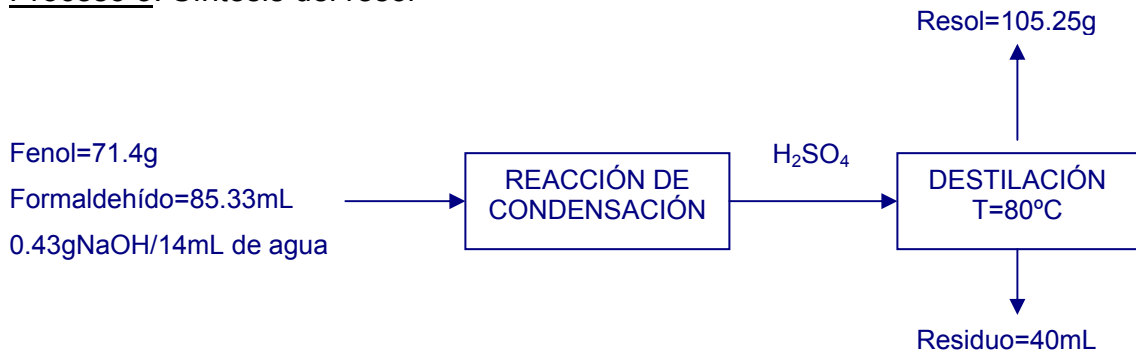


Figura 32. Balance de masa para la síntesis del resol

En el residuo se encuentra agua, fenol libre, y formaldehído.

Posteriormente se realizó el curado, durante este proceso hay pequeñas pérdidas de peso por la formación de gases como CO_2 , causantes de la porosidad del material.

4.6 APLICACIONES

Los productos obtenidos tienen un amplio campo de aplicación, aunque es necesario realizar un estudio más exhaustivo de sus propiedades.

- El policarbonato extraído puede ser empleado como materia prima para la fabricación de diversos productos de moldeo. Gracias a las excelentes propiedades de procesamiento se puede obtener casi cualquier forma en el producto final.
- Las resinas al igual que todos los polímeros se emplean con adición de cargas. Al adicionar un 50% p/p de aserrín finamente molido como carga al

resol modificado con un 30%p/p de policarbonato, se obtuvo un producto similar al triplex (figura 33) pero más resistente que este, con las excelentes propiedades que caracterizan los materiales plásticos.



Figura 33. Resol modificado con aserrín como carga

También se sintetizó un resol modificado (con 20%p/p de policarbonato) espumado con 20% de aserrín como carga, los cuales tienen gran aplicación como aislantes eléctricos (figura 34).



Figura 34. Resol modificado espumado con aserrín como carga

5. CONCLUSIONES

- El porcentaje de recuperación del policarbonato contenido en los discos compactos fue del 89%, por lo tanto la metodología propuesta es factible para ser empleada a gran escala.
- Es de destacar que la relación solvente-discos compactos es de 1:2, lo cual llevado a escala industrial, contribuiría notablemente en la recolección de discos compactos para tal fin. La adquisición de estos discos compactos conllevaría a la generación de empleo para aquellas cooperativas de recicladores, así como también, en la disminución del impacto ambiental que produce este material cuando se convierte en basura.
- La metodología descrita en el presente trabajo, nos permite visualizar un proceso alternativo y económico ya que se obtuvo un producto de alto valor agregado a partir de un material desechado no biodegradable, además es posible la recuperación de los solventes con un buen porcentaje del 73.33% y 70.78% para etanol y fenol respectivamente.
- El policarbonato post-consumo obtenido presentó buenas características físicas y químicas, así como una absorción de agua mínima, buena resistencia al ataque por ácidos débiles y solventes, razón por la cual puede ser utilizado como materia prima en la fabricación de diferentes productos en los que se requiera un material con estas propiedades.
- A concentraciones bajas, el policarbonato es resistente al ataque básico, esto representa una gran aplicación del policarbonato en la industria de la construcción, especialmente en baldosas, ya que las bases comerciales

empleadas en los productos de limpieza son de baja concentración y no afectan la estructura del material

- El estudio realizado demostró que es posible hacer la incorporación del policarbonato (PC) en resoles para la obtención de resinas fenólicas modificadas, con una variación de las propiedades mecánicas del material.
- Por muchos años uno de los objetivos principales de la ciencia y tecnología de los polímeros, ha sido el desarrollo de variantes químicas en los materiales ya existentes, sin embargo, esto suele ser costoso y no siempre conduce a la mejora de las propiedades del material. La mezcla obtenida (resol modificado) permite mejorar las propiedades fisicomecánicas de los resoles bajo condiciones económicamente viables, que fomentan el reciclaje de desechos plásticos.
- La adición de aserrín como carga al resol modificado fue exitosa, lográndose identificar posibles aplicaciones en el campo eléctrico.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer una extracción previa de los metales presentes en los discos compactos realizando una disolución de estos en HCl, para luego ser separados mediante un proceso electrolítico y así obtener el metal en su estado elemental.
- Debido a la tecnología utilizada en la experimentación se obtuvieron materiales poco homogéneos, haciéndose necesario un sistema de desaireado o de inyección para realizar el moldeo con el fin de evitar la porosidad que se presentó en el material obtenido.
- El proceso de incorporación del policarbonato al resol, el mezclado y el moldeo podrían ser realizados con una mayor tecnología para obtener resultados más rigurosos, lo cual implica un aumento en la inversión para equipos.
- La utilización de diferentes cargas varía según el tipo de compuesto fenólico que se desee obtener, en este trabajo se mostró una aplicación utilizando como carga el aserrín de madera, lográndose la incorporación del PC; por lo que cambiar la carga sería una variable importante para un estudio posterior, identificando si se puede incorporar el PC y además estudiando el comportamiento mecánico del nuevo producto.
- Para confirmar la variación de la resistencia mecánica del resol modificado se recomienda realizar ensayos de resistencia a la flexión y al impacto.

BIBLIOGRAFÍA

1. KAHL Rolf. 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. SERRANO D.P; AGUADO J. 2001. Reciclado químico de plásticos. Revista de plásticos modernos. 82 (542). 155-160.
4. MAGRUGA E. L. 1995. Que es un polímero. Revista de plásticos modernos. (466). 319-324.
5. ARENAS Helena. Polímeros. Ediciones UIS. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.1999. 13-19.
6. BARON William; PALACIOS Jhon. 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.
7. BAYER AG, 2004. Breve historia del descubrimiento del policarbonato. Revista de plásticos modernos. 87 (574). 314-319.

8. GARZON 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. BAYER AG. 2002. Makroform: Planchas de policarbonato y poliéster. Revista de plásticos modernos. 83 (551). 448-458.
11. SALGADO Cecilia. Permanencia en CD-R (discos compactos gravables) [on line]. Mexico 2001. Disponible en: < <http://www.lmi.com.mx/revista/conservacion/16.html>>.
12. BAYER A. G. 2004. En diversos productos, Makrolon marca la diferencia. Revista de plásticos modernos. 87 (574). 320-329.
13. BAYER HISPANIA, S.A. Reciclar CDS. El mercado del policarbonato [on line]. Jun 2003. Plast Univers. Disponible en: <<http://www.Plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=6633>>.
14. SN. ULLMANN'S ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY. Sexta edition. Weinheim, Germany. Electronic Release Wiley-VCH. 2002.
15. LG. CHEMICAL Ltd. 2003. Phosgene-free process cuts polycarbonate costs. Process Engineering. 11.
16. SANTAMARIA R; SALVADOR F. 2004. Las resinas fenólicas y sus aplicaciones en la industria de la automoción. Revista de plásticos modernos. 37 (576). 548-552.

17. FERREIRA Luz; DURAN Nury. Formulación de resinas fenol formaldehído con adición de polietilentereftalato de botellas no retornables. 2003. Tesis de grado. Escuela de química. Facultad de Ciencias. Universidad Industrial de Santander. 4, 13-27.
18. REY Alvaro. Laboratorio de resistencia de materiales. Ediciones UIS. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 2000. 30-42.
19. STIOPIN P.A. Resistencia de Materiales. Moscú. 1968. 24-84, 328-330.
20. TIMOSHENKO S. Resistencia de Materiales. Espasa-Calpe S.A. España-Madrid. 1947. 405-407.
21. ASTM D 792-00. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.
22. ASTM D 570-98. Standard Test Methods for Water Absorption of Plastics.
23. ASTM D 543-95. Standard Test Methods for Evaluating the Resistance of Plastic to Chemical Reagents.
24. SANCHEZ Johan. Comportamiento térmico y mecánico del polietileno tereftalato (PET) modificado con resinas poliméricas basadas en Bisfenol-A. 2003. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 17-19, 71-80.
25. ARENAS Helena. El estado sólido y propiedades de los materiales. Ediciones UIS. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. 1999. 28-37.

Enlaces recomendados

< http://www.infolac.ucol.mx/observatorio_programa_recicla_cd.html>
<<http://www.Plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=6633>>
<<http://www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Policarbonato.HTML>>
<<http://www.lmi.com.mx/revista/conservacion/16.html>>
<<http://www.psrc.esm.edu/macrog/pc.htm>>
<http://www.infolac.ucol.mx/observatorio/programa_recicla_cd.html>
<<http://www.bayerandina.com/bayerand.nsf>.
<<http://www.aceroslevinson.com/plasticos/policarbonato.htm>>.

ANEXOS

ANEXO A

TABLAS DE PROPIEDADES DEL POLICARBONATO

1 Propiedades Eléctricas

Constante Dieléctrica a 1MHz	2.9
Factor de Disipación a 1 MHz	0.01
Resistencia Dieléctrica (kV mm ⁻¹)	15-67
Resistividad Superficial (Ohm/sq)	10 ¹⁵
Resistividad de Volumen (Ohmcm)	10 ¹⁴ -10 ¹⁶

Tabla 1. Propiedades eléctricas del policarbonato

2 Propiedades Físicas

Absorción de Agua - Equilibrio (%)	0.35
Absorción de Agua - en 24 horas (%)	0.1
Densidad (g/cm ³) a 25°C	1.2
Índice Refractivo	1.584-6
Inflamabilidad	VO-V2
Resistencia a la Radiación	Aceptable
Resistencia a los Ultra-violetas	Aceptable

Tabla 2. Propiedades físicas del policarbonato

3 Propiedades Mecánicas

Alargamiento a la Rotura (%)	100-150
Coefficiente de Fricción	0.31
Dureza – Rockwell	M70
Módulo de Tracción (GPa)	2.3-2.4
Relación de Poisson	0.37
Resistencia a la Abrasión - ASTM D1044 (mg/1000 ciclos)	10-15
Resistencia a la Compresión (MPa)	>80
Resistencia a la Tracción (MPa)	55-75
Resistencia al Impacto Izod (J m ⁻¹)	600-850

Tabla 3. Propiedades mecánicas del policarbonato

4 Propiedades Térmicas

Calor Específico ($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$)	~1200
Coefficiente de Expansión Térmica ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	66-70
Conductividad Térmica a 23C ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.19-0.22
Temperatura Máxima de Utilización (°C)	115-130
Temperatura Mínima de Utilización (°C)	-135
Temperatura Defección en Caliente – 0.45Mpa (°C)	140
Temperatura Deflección en Caliente – 1.8Mpa (°C)	128-138
Temperatura de fusión (°C)	245-250

Tabla 4. Propiedades térmicas del policarbonato

5 Resistencia Química

Ácidos – concentrados	Buena
Ácidos – diluidos	Buena
Álcalis	Buena-Mala
Alcoholes	Buena-Mala
Cetonas	Mala
Grasas y Aceites	Buena-Aceptable
Halógenos	Mala
Hidro-carbonios halógenos	Buena-Mala
Hidrocarburos Aromáticos	Mala

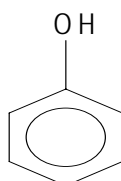
Tabla 5. Resistencia química del policarbonato

(<http://www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Policarbonato.HTML>)

ANEXO B

DESCRIPCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS DEL RESOL

1. Fenol



Sinónimos: *Acido fénico, ácido carbólico, hidróxido de fenilo, hidroxibenceno.*

Usos:

- Industria de materias plásticas (fenoplastos, poliepóxidos, policarbonatos).
- Industria de las fibras sintéticas (poliamidas, etc.).
- Refinería de petróleos.
- Industria farmacéutica.
- Fabricación de detergentes, pesticidas (principalmente clorofenoles), colorantes, aditivos para aceites, etc.

Propiedades físicas: El fenol se presenta bajo forma de una masa cristalina o de agujas incoloras. Posee un olor particular, a la vez acre y dulzaino.

En presencia de impurezas o bajo influencia de la luz, el aire y ciertos catalizadores como el cobre y el hierro, este producto puede teñirse de amarillo, marrón o rojo.

A 16 °C, el fenol es soluble en el agua a razón de un 6.7 % en peso; es soluble en todas las proporciones a la temperatura de 66 °C.

Es muy soluble en alcohol etílico, éter etílico, benceno, cloroformo, sulfuro de carbono, etc. El valor de pH (500 g/l) a 20 °C está entre 4 y 5.

Peso molecular	94.11
Punto de fusión	40.9 °C
Punto de ebullición (760 mm Hg)	181.8 °C
Densidad (D ²⁵)	1.058 (g/cm ³)
Densidad de vapor (aire = 1)	3.24
Tensión de vapor:	
40 °C	1 mm
86 °C	20 mm
121 °C	100 mm
160 °C	400 mm
Punto de inflamación:	
En vaso cerrado	79.4 °C
En vaso abierto	85 °C
-Temperatura de autoignición	595 – 715 °C

Tabla 6. Propiedades físicas del fenol

Propiedades químicas: Por calentamiento en torno a 800 °C, el fenol se descompone totalmente en monóxido de carbono, hidrógeno y carbono.

Numerosos oxidantes reaccionan con el fenol: con el agua oxigenada y el ácido persulfúrico hay formación de pirocatecol, hidroquinona y quinona; con el permanganato potásico se obtiene ácido oxálico y pequeñas cantidades de difenoles y ácido salicílico. El ácido nítrico diluido o concentrado reacciona con el fenol con formación de ácido pícrico, que es un producto explosivo.

La reducción del fenol en presencia de cinc conduce al benceno.

Numerosas reacciones de condensación son posibles con el fenol, en particular con los aldehídos y las cetonas.

Identificación de peligros: Tóxico en contacto con la piel y por ingestión.
Provoca quemaduras

Primeros auxilios: Tras contacto con la piel, lavar con polietilenglicol 300 y etanol (2:1) y después con mucha agua y jabón. Tras contacto con los ojos, enjuagar los ojos con agua durante varios minutos.

Medidas de lucha contra incendios: Las sustancias extintoras adecuadas son el CO₂, polvo de extinción o chorro de agua pulverizada. Combatir incendios mayores con chorro de agua pulverizada o espuma resistente al alcohol.

Medidas que deben tomarse en caso de vertido accidental: Quitar con material absorbente, aplicar medio de neutralización y asegurar ventilación suficiente.

Manipulación y almacenamiento: Mantener el depósito cerrado de forma estanca, en sitio frío, seco, bien ventilado y en contenedores resistentes a la luz.

Equipo de protección personal: Ropa protectora, guantes y gafas herméticas.

Límite de exposición permisible: 19 mg/m³ (5 p.m.)

Informaciones toxicológicas: Efecto cáustico para piel y mucosa. La ingestión produce un fuerte efecto cáustico en la boca y la faringe, así como el peligro de perforación del esófago y estómago.

Información de tipo ecológico:

- Peligroso para el agua.
- No dejar infiltrarse en las aguas subterráneas, ni públicas, ni en el alcantarillado.
- No debe llegar a las aguas residuales o a la zanja de desagüe, cuando no esté diluido ni neutralizado.

2. Formaldehído



Sinónimos: Metanal, aldehído fórmico, formol.

Usos:

- Industria de las materias plásticas: fabricación de resinas fenoplásticas, aminoplásticas y poliacetal.
- Fabricación de diferentes productos químicos, especialmente hexametilenotetramina y el pentaeritrol.
- Preparación de ciertos desinfectantes e insecticidas.
- Industria textil, papeles, colorantes, cueros, etc.

Propiedades físicas A la temperatura ordinaria el formaldehído es un gas incoloro, inflamable, de olor muy irritante. Es soluble en el agua y los disolventes orgánicos usuales, pero insoluble en el éter de petróleo.

En la práctica, este compuesto se suministra bajo la forma de soluciones acuosas a concentraciones diversas (37-50% en peso). Son líquidos incoloros, de olor picante, miscibles con agua. Contienen alcohol metílico (hasta un 15 %) y trazas de ácido fórmico y ácido acético. Valor de pH a 20°C entre 4 y 6.

Peso molecular	30.03
Punto de fusión	- 92°C
Punto de ebullición (760 mm Hg)	-19.5 °C
Densidad (20 °C)	1.09 (g/cm ³)
Densidad de vapor (aire = 1)	1.075

Tensión de vapor:	
- 88 °C	10 mm
- 70.6 °C	40 mm
- 57.3 °C	100 mm
- 33 °C	400 mm
Temperatura de autoignición	300 -430 °C

Tabla 7. Propiedades físicas del formaldehído

Propiedades químicas: El formaldehído es un compuesto extremadamente reactivo. Se polimeriza muy fácilmente, incluso en frío, dando polímeros insolubles que enturbian las soluciones acuosas. Para evitar este inconveniente se les añaden estabilizantes, particularmente alcohol metílico.

Los oxidantes reaccionan enérgicamente con el formol. La mayoría de las reacciones de oxidación conducen a la formación de ácido fórmico, y la oxidación completa da lugar a anhídrido carbónico y agua.

A pesar de su fuerte reactividad, es un compuesto relativamente estable. El calor no lo descompone sensiblemente más que por encima de 300 °C, con formación de óxido de carbono e hidrógeno. Esta descomposición está favorecida por ciertos catalizadores.

Identificación de peligros: Tóxico en contacto con la piel, por inhalación y por ingestión. Provoca quemaduras.

Primeros auxilios: Tras contacto con la piel, lavar con mucha agua y jabón. Tras contacto con los ojos, enjuagar durante varios minutos los ojos con agua.

Medidas de lucha contra incendios: Las sustancias extintoras adecuadas son el CO₂, polvo de extinción o chorro de agua pulverizada. Combatir incendios mayores con chorro de agua pulverizada o espuma resistente al alcohol. Poner la protección respiratoria.

Medidas que deben tomarse en caso de vertido accidental: Quitar con material absorbente, aplicar medio de neutralización y asegurar ventilación suficiente. Diluir con mucho agua.

Manipulación y almacenamiento: Mantener el depósito cerrado de forma estanca, en sitio frío, seco y bien ventilado. Mantener disponibles los equipos de respiración.

Equipo de protección personal: Ropa protectora, guantes, protección respiratoria con filtro y gafas herméticas.

Informaciones toxicológicas: Efecto cáustico para piel y mucosa. La ingestión produce un fuerte efecto cáustico en la boca y la faringe, así como el peligro de perforación del esófago y estómago.

Información de tipo ecológico:

- Peligroso para el agua.
- No dejar infiltrarse en las aguas subterráneas, ni públicas, ni en el alcantarillado.
- No debe llegar a las aguas residuales o a la zanja de desagüe, cuando no esté diluido ni neutralizado.