

**DESARROLLO DE LAMINADOS IMPERMEABLES A NIVEL PILOTO
SOBRE MATERIALES MDF A PARTIR DE PET POST-CONSUMO**



**DORIS DEL SOCORRO OBANDO CORAL
ARGEMIRO RINCÓN ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES
BUCARAMANGA
2006**

**DESARROLLO DE LAMINADOS IMPERMEABLES A NIVEL PILOTO
SOBRE MATERIALES MDF A PARTIR DE PET POST-CONSUMO**

**DORIS DEL SOCORRO OBANDO CORAL
ARGEMIRO RINCÓN ORTIZ**

Trabajo presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Químico

Director
EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY
Ingeniero Químico Ph.D.

Codirector
JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ GALLEGO
Químico M.Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES
BUCARAMANGA
2006**

*A Dios y a la Virgen de las Lajas, que me han brindado
la fortaleza para alcanzar todas mis metas
A mis padres, Socorro y Plácido, que siempre
me han apoyado en la conquista de mis ideales
A mi hermano, mis tías y amigos, que compartieron
mis alegrías y temores durante esta larga trayectoria
en la búsqueda de este primer gran triunfo.*

DORIS DEL SOCORRO..

A Dios y a la Virgen por ser mis guías espirituales y luces de mi camino.

*A mis padres Nidia y Argemiro, por todo su amor,
apoyo y comprensión, que han permitido cumplir mis metas en la vida*

A mis hermanos Andrés y Carolina por su voz de aliento

A mi familia por estar siempre cuidando de mí y su confianza

A Joha mi angelito que ha llenado mi vida de alegría

*A todos mis verdaderos amigos de la Universidad y
de Atletismo, por estar ahí, en los buenos y malos momentos.*

ARGEMIRO

AGRADECIMIENTOS

Nuestros sinceros agradecimientos:

Al Doctor Edgar Fernando Castillo Monroy, director del proyecto por su colaboración y apoyo para la realización del presente proyecto.

Al Maestro José Carlos Gutiérrez, codirector del proyecto por su colaboración y aporte de valiosas ideas que consiguieron sacar adelante este proyecto.

A los miembros del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales - CEIAM, quienes a través de los seminarios aportaron ideas para el desarrollo del proyecto.

A los técnicos Eduardo, Wilson y al Ingeniero Guillermo del Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química por su colaboración en este trabajo de grado.

Al Ingeniero David Tirado y al Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente al por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

A los miembros del grupo de Investigaciones en Polímeros por su colaboración en la realización del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS TEÓRICO	3
1.1 POLIETILEN TEREFTALATO	3
1.2 ACEITE DE HIGUERILLA	5
1.3 ISOCIANATOS	6
1.4 POLIURETANOS	6
1.5 ANÁLISIS Y ENSAYOS	8
1.5.1 Caracterización físico-mecánica	8
1.5.2 Caracterización físico-química	8
1.5.3 Análisis térmicos	9
1.5.4 Espectroscopía de infrarrojo	9
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	10
2.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	10
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	11
2.2.1 Reducción de tamaño del PET post-consumo	11
2.2.2 Disolución de PET en fenol	11
2.2.3. Incorporación del aceite de higuera a la solución PET/fenol	12
2.2.4 Incorporación de aditivos	12
2.2.5 Estudio del mecanismo de aplicación	12
2.2.6 Caracterización de los recubrimientos	12
2.2.7 Cálculo de los índices de masa y energía	13

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS	Pág. 14
3.1 DISOLUCIÓN DE PET EN FENOL	14
3.2 FORMULACIÓN DEL RECUBRIMIENTO	15
3.2.1 Incorporación del aceite de higuera a la solución pet/fenol	16
3.2.2 Incorporación de aditivos	16
3.3 ESTUDIO DEL MECANISMO DE APLICACIÓN	17
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POLIURETÁNICOS	20
3.4.1 Caracterización físico-mecánicas	20
3.4.2 Caracterización físico-química	23
3.4.3 Análisis térmico	25
3.4.4 Espectroscopía de infrarrojo	26
4. CÁLCULOS DE ÍNDICES DE MASA Y ENERGÍA	27
4.1 CÁLCULO DE ÍNDICES DE MASA	27
4.2 CÁLCULO DE ÍNDICES DE ENERGÍA	28
5. CONCLUSIONES	31
6. RECOMENDACIONES	32
BIBLIOGRAFÍA	33
ANEXOS	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. Propiedades fisicoquímicas del PET	4
TABLA 2. Relación PET/fenol proceso de disolución	14
TABLA 3. Incorporación de aditivos	16
TABLA 4. Determinación porcentaje de absorción de agua	21
TABLA 5. Datos de adherencia	22
TABLA 6. Observaciones del ensayo de ataque químico	23
TABLA 7. Análisis termogravimétricos	25
TABLA 8. Reporte de densidades	27

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Monómero del PET	3
FIGURA 2. Molécula del triglicérido de ácido ricinoléico	5
FIGURA 3. Estructura del Toluen Diisocianato (TDI)	6
FIGURA 4. Reacción de formación de poliuretanos	7
FIGURA 5. Estructura general de los poliuretanos	7
FIGURA 6. Diagrama de flujo de la metodología experimental	10
FIGURA 7. Montaje para la reacción	11
FIGURA 8. Solución PET/fenol a 25°C	15
FIGURA 9. Solución PET/fenol a 160°C	15
FIGURA 10. Aditivo: Carbonato de calcio	16
FIGURA 11. Aditivo: Alcohol polivinílico	16
FIGURA 12. Prensado con láminas de vidrio	17
FIGURA 13. Mecanismo de aplicación	18
FIGURA 14. Curado a temperaturas mayores a la ambiente	19
FIGURA 15. Porcentaje de dureza vs. ml aceite de higuera	20
FIGURA 16. Resistencia al impacto vs. ml aceite de higuera	21
FIGURA 17. Gráfica de los datos obtenidos de adherencia	22
FIGURA 18. Fotografía a escala del espesor del recubrimiento	23
FIGURA 19. Gráficas del ataque químico	24

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Datos ensayos de adherencia	36
ANEXO B. Datos ataque químico	41
ANEXO C. Datos resistencia al impacto	43
ANEXO D. Análisis termogravimétrico (TGA)	45
ANEXO E. Espectros infrarrojos (FTIR)	49
ANEXO F. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	53
ANEXO G. Registro fotográfico	57

RESUMEN

TÍTULO:

DESARROLLO DE LAMINADOS IMPERMEABLES A NIVEL PILOTO SOBRE MATERIALES MDF A PARTIR DE PET POST-CONSUMO**

AUTORES:

Doris del Socorro Obando Coral
Argemiro Rincón Ortiz**

PALABRAS CLAVES:

PET post-consumo, reciclaje de plásticos, recubrimientos poliuretánicos.

DESCRIPCIÓN:

Se desarrollaron recubrimientos poliuretánicos a partir de PET post-consumo sobre materiales MDF, con el objetivo de contribuir con el desarrollo de los procedimientos de disposición final de residuos sólidos e incrementar el valor agregado de estos materiales. Este trabajo describe una posible alternativa de solución para el reciclaje del polietileno tereftalato (PET) a nivel piloto, iniciando con un estudio de las variables que influyen en la reacción. Seguido de esto, se determinan que variables son fijas para el escalamiento del proceso y se continúa con la formulación del recubrimiento. Finalmente, se caracterizan los productos resultantes del proceso.

En general, los recubrimientos desarrollados presentan muy buenas características físicas y químicas que los hacen aprovechables en varios sectores de la industria, obteniendo porcentajes de absorción de agua menores al 0.01%, esfuerzo máximo de adhesión mayor a 1104 psi y buena resistencia al ataque de agentes químicos. Esto los hace especialmente útiles para la protección de materiales MDF, ya que estos últimos son altamente sensibles a la humedad, disminuyendo su tiempo de vida útil y su campo de aplicación.

Cabe destacar que los recubrimientos desarrollados, se formularon con reactivos comerciales, y se obtuvieron láminas de MDF recubiertas hasta de 20x20 cm², pensando en un posible escalamiento del proceso a nivel industrial.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Química, Director Edgar Fernando Castillo Monroy, Ph.D., José Carlos Gutiérrez, M.Sc

SUMMARY

TITLE:

DEVELOPMENT OF WATERPROOF COATINGS AT PILOT LEVEL TO COVER MDF MATERIALS FROM WASTE PET*

AUTHORS:

Doris del Socorro Obando Coral
Argemiro Rincón Ortiz**

KEY WORDS:

Waste PET, recycling of plastic, polyurethane coatings.

DESCRIPTION:

Polyurethane coatings were developed from waste PET to cover MDF materials, to contribute with the development of procedures of final disposition of solid residues and increase the value added of these materials. This work describes a possible alternative of solution for the recycling of polyethylene terephthalate (PET) at pilot level. First of all, it was studied the variables that influence the reaction. Then, it was determined the fixed variables to scale the process and it was continued by the formulation of the coating. Finally, the resultant products of the process were characterized.

In general, the developed coatings present very good physical and chemical characteristics that make them usable in several sectors of the industry; it was obtained percentages of water absorption minors to 0.01 %, maximum effort of adhesion mayor to 1104 psi and good chemical and solvent resistance. Those characteristics make them especially useful for the protection of MDF materials, which are highly sensitive to the dampness, decreasing its time of useful life and its field of application.

It is necessary to emphasize that the developed coverings, were formulated by commercial reagents, and covered MDF's sheets were obtained even of 20x20 cm², thinking about a possible scaling of the process to industrial level.

* Degree project

** Faculty of physical chemistry engineering, School of chemical engineering, Project Directors Edgar Fernando Castillo Monroy, Ph. D and José Carlos Gutiérrez, M.Sc

INTRODUCCIÓN

La cantidad de desechos plásticos en los rellenos sanitarios ha crecido rápidamente en los recientes años, alcanzando entre 5-10% en masa y porcentajes mayores en volumen ⁽¹⁷⁾, haciendo de este uno de los problemas más relevantes en la actualidad.

El polietilentereftalato (PET) es uno de los plásticos más ampliamente utilizados en la manufactura de diferentes clases de empaques, especialmente para botellas de bebidas, fibras y filmes. A nivel mundial se consumen alrededor de 13 millones de toneladas de PET anuales. En consecuencia, la siempre creciente producción y el uso del PET han llevado a problemas en la disposición de los desechos plásticos después de su uso debido a que este no es biodegradable ^(7, 17,20). Por lo anterior, el uso efectivo de PET post-consumo es un campo de investigación de gran importancia para los investigadores en cuanto a la protección del medio ambiente.

Muchas soluciones se han llevado a cabo para el manejo de desechos sólidos de plásticos como la incineración, disposición bajo tierra, plásticos degradables y reciclaje. La incineración de plásticos libera gases tóxicos, los cuales pueden representar un grave problema para la salud. El reciclaje de polímeros no es tampoco una solución permanente debido a que lleva a obtener productos de pobre calidad. Por lo tanto, la utilización del PET post-consumo para la fabricación de nuevos productos de mayor valor agregado es un importante tema de investigación para la mayoría de las industrias y los científicos⁽ⁱ⁾.

Este trabajo apunta no solamente a contribuir en el desarrollo del manejo de residuos sólidos plásticos como el PET, sino que también pretende dar un mayor valor agregado a sustancias como el MDF, el fenol residual de las plantas de refinación, el aceite de higuera y el mismo PET.

ⁱ Referencias (6,7,14,16,17,20).

El lector encontrará consignado en este documento el trabajo de investigación que planteó el desarrollo, la evaluación y el diseño de un procedimiento para la elaboración uniforme de laminados impermeables coloreados sobre materiales MDF a partir de PET post-consumo.

El contenido de este libro abarca 6 capítulos. El primer capítulo comenzará aclarando algunos conceptos teóricos claves en el desarrollo de la investigación, referentes a los materiales usados en la elaboración del recubrimiento poliuretánico, así como a los ensayos de caracterización, a que están sujetos. Posteriormente se describirá el procedimiento experimental desarrollado en la investigación, tanto en la formulación del recubrimiento y el estudio del mecanismo de aplicación, como en su caracterización y el cálculo de los índices de masa y energía.

Seguidamente se presentarán las condiciones de trabajo y los resultados obtenidos del procedimiento experimental descrito en el anterior capítulo, con su correspondiente análisis. En el capítulo siguiente se encontrará el cálculo de los índices de masa y energía, necesarios escalar el proceso. Finalmente se plantearán las conclusiones arrojadas por el trabajo, así como las recomendaciones que se consideren pertinentes. En los anexos puede encontrarse información sobre los datos de las diferentes pruebas realizadas para la caracterización de los materiales obtenidos.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

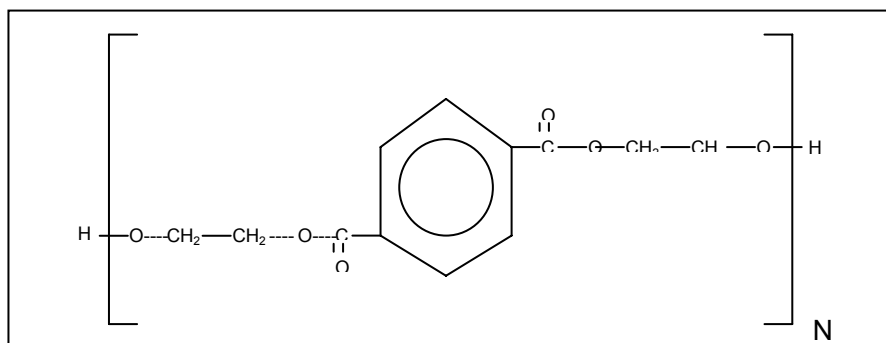
Este capítulo consignan los conceptos teóricos referente a las materias primas utilizadas en la elaboración de los recubrimientos poliuretánicos, como a las pruebas de caracterización a las cuales están sujetos.

1.1 POLIETILEN TEREFALATO ^(1,2,7)

El Polietilen tereftalato (PET), es un tipo de plástico termoestable, perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres, fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras.

El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, producto de la policondensación del ácido tereftalático y el monoetilenglicol, y su monómero esta representado en la figura 1.

Figura 1. Monómero del PET



Entre los diferentes grados de cristalinidad que se obtienen en función del nivel de organización de las cadenas de moléculas, se encuentran los siguientes: el PET totalmente cristalino, que presenta cadenas perfectamente ordenadas, lo que le confiere una elevada resistencia mecánica y térmica; y el PET que presenta cadenas totalmente desordenadas, que se conoce como amorfo, cuyacaracterística principal es su transparencia en detrimento de sus propiedades térmicas y mecánicas. Siendo este último el objeto de nuestra investigación.

El PET en general se caracteriza por su excelente resistencia química, frente a ácidos, bases, sales, jabones, alcoholes y aceites; no transmite ningún tipo de olor o sabor a los alimentos (el material reciclado no se recomienda como empaque de alimentos por factores higiénicos); excelentes características de barrera, tanto para el agua como para el oxígeno y el anhídrido carbónico; débil propagación a la llama con combustión lenta; su incineración no da ningún residuo tóxico o corrosivo; admite esterilización con rayos gamma; no sufre blanqueamiento a la tracción o al pegado; buena resistencia al impacto; sobresale por su gran transparencia y brillo.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del PET

Propiedad		Valor
Coeficiente de volumen de expansión	De 30 a 60 °c	$1.6 \cdot 10^{-4}$ grados ⁻¹
	De 90 a 190 °c	$3.7 \cdot 10^{-4}$ grados ⁻¹
Densidad específica a 25 °c	Amorfo	1.335 g/cc
	Cristal orientado	1.390 g/cc
Temperatura de transición vitrea (Tg)	Amorfo	67 °c
	Cristalino	81 °c
	Cristalino y orientado	125 °c
Punto de derretimiento	PET comercial	265 °c
	PET puro	271 °c
Absorción de humedad (inmersión en agua a 25 °c durante 1 semana)		0.8%
Resistividad	A 25 °c	$1 \cdot 10^{18}$ ohmnios*cm
	A 150 °c	$1 \cdot 10^{13}$ ohmnios*cm
Conductividad térmica		$3.36 \cdot 10^{-4}$ cal/(cm*s* °c)

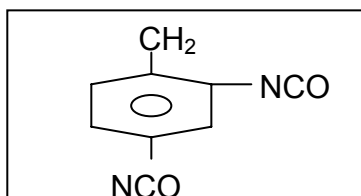
Fuente: BARÓN W Y PALACIOS J (2001)

1.3 ISOCIANATOS ^(3, 4, 5,7)

Son compuestos que se obtienen industrialmente a través de la fosgenación de (reacción con grupo fosgeno: COCl_2) de aminas primarias. Su grupo funcional es (-N=C=O); que se puede observar en la figura 3, el cual es de elevada reactividad dado el gran contenido de instauraciones. Estos compuestos poseen en su estructura uno o dos grupos funcionales; reaccionan con aminas, amidas y ácidos carboxílicos para formar urea y con ésteres, éteres y alcoholes para formar uretanos. Los isocianatos más utilizados en la industria son los diisocianatos, de los cuales los más comunes son TDI, MDI, HDI, NDI e IPDI.

El Toluen Diisocianato (TDI) es un elemento químico muy importante en una variedad muy amplia de aplicaciones de poliuretano. Su uso más importante está en la producción de espumas de poliuretano flexible para muebles, camas, bajo-alfombras y asientos automotrices. El TDI se usa también en la producción de adhesivos, recubrimientos, selladores y elastómeros.

Figura 3. Estructura del Toluen Diisocianato (TDI)



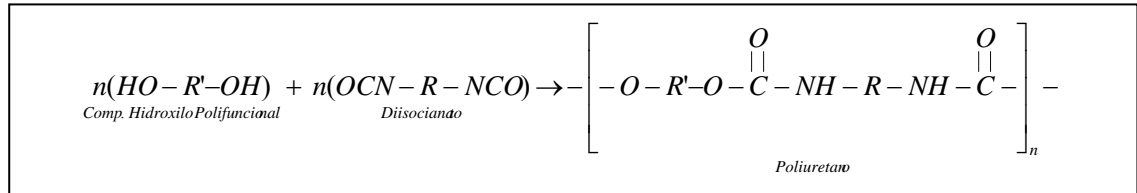
1.4 POLIURETANOS ^(4, 5,7)

Los poliuretanos son polímeros formados por reacciones de poliadición por etapas de no condensación, entre poliisocianatos y compuestos polihidroxílicos tales como poliéteres, poliésteres, glicoles ó polioles. Su nombre proviene del grupo uretano, característico de los ésteres del ácido carbámico ($\text{H}_2\text{N-COOH}$). Fueron descubiertos en 1937 por Bayer y colaboradores, a través de la polimerización por adición de diisocianatos con 1,4- butilenglicol.

A nivel comercial la producción de poliuretanos se basa en la reacción de componentes hidroxílicos polifuncionales (dentro de los cuales se encuentra el

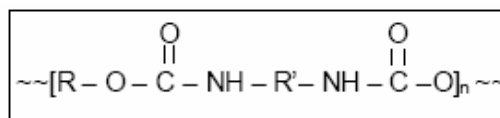
aceite de higuera) con diisocianatos. La reacción de formación de poliuretanos se puede ver en la figura 4.

Figura 4. Reacción de formación de poliuretanos



Esta reacción está influenciada por diferentes factores como la estructura y funcionalidad de sus componentes; ubicación de sustituyentes; tipo de solvente y catalizador, en caso de ser utilizado; presencia de impurezas y temperatura.

Figura 5. Estructura general de los poliuretanos



Dependiendo del tipo de polioli, isocianato, catalizador, estabilizador y aditivo se pueden obtener un número muy amplio de estructuras y propiedades del material poliuretánico, los cuales han incrementado las aplicaciones y usos en muchas industrias debido a la diversidad de las propiedades físicas obtenidas. Son los polímeros más usados y de mayor crecimiento en el mundo, se usan como materiales que van desde construcción hasta rellenos taxidérmicos. Entre las aplicaciones intermedias se incluyen espumas flexibles para sellantes, cojines y colchones, espumas de recubrimiento en volantes, tablero de instrumentos e interiores para automóviles. Las espumas semirígidas se usan para paneles industriales, espumas de absorción de energía, como material termoaislante. Mediante el uso de aditivos y catalizadores, los poliuretanos pueden también ser formulados como recubrimientos, adhesivos, sellantes y elastómeros.

1.5 ANÁLISIS Y ENSAYOS

1.5.5 Caracterización físico-mecánica.

- **Dureza** ^(4,5,9): Se define como la resistencia de los materiales a ser penetrados, absorber energía o ser cortados. El método por penetración está basado en la aplicación de una carga estática sobre la superficie de un material para provocarle una deformación permanente conocida como indentación, la cual presenta una profundidad que está en relación inversa al número de dureza del material ensayado. La dureza para plásticos puede variar en amplio rango desde una dureza Shore A de 10 hasta Shore D de 75. Sin embargo para muchas aplicaciones comerciales el intervalo de Shore A es de 60 a 100.
- **Absorción de agua** ^(10,24): En este ensayo de absorción, el material se sumerge en agua por un periodo de 24 horas. El porcentaje de absorción se determina mediante la siguiente ecuación:

$$A_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100$$

Donde:

A_m = absorción (%)
 m_1 = masa inicial (g)
 m_2 = masa final (g)

- **Adherencia** ⁽¹⁹⁾: La adhesión se define como la suma de interacciones moleculares entre dos materiales.

1.5.2 Caracterización físico-química.

- **Solubilidad y ataque químico** ^(4,12,21): Un disolvente en contacto con un polímero, penetra en el interior de la masa sólida y separa las macromoléculas provocando un fenómeno de hinchamiento, éste hinchamiento crece con la difusión del líquido hasta que la dispersión de las macromoléculas dentro del disolvente es completa. En los polímeros, se observan fenómenos parecidos a la saturación, siendo en general la cantidad de polímero disuelto función de la masa de la fase no dispersa.

La solubilidad puede acelerarse por agitación y temperatura; sin embargo, el proceso de disolución puede ser bastante lento (días o semanas) para materiales de muy alto peso molecular; y en algunos casos, como los poliuretanos de aceite de higuera, se produce solamente hinchamiento.

1.5.3 Análisis térmicos.

➤ **Análisis termogravimétrico (TGA)** ^(4,7,12): Esta técnica mide la pérdida de masa (en general en forma de gas) de una muestra sólida o líquida en función de la temperatura. Se trata por tanto de una balanza de alta precisión conectada a un equipo calefactor de temperatura controlada. Los cambios que se observan en los termogramas son procesos degradativos que liberan moléculas de pequeño tamaño que se vaporizan. Según la temperatura y la magnitud de cada cambio se pueden sacar conclusiones sobre las reacciones de degradación de cada muestra.

➤ **Calorimetría diferencial de barrido (DSC)** ^(7,12): mediante dicha técnica se miden los cambios de energía que experimenta una muestra con la temperatura, ya que todos los cambios físicos y químicos de una sustancia van asociados a un cambio de energía. Los DSC constan de dos celdas, una de referencia y otra para la muestra. En todo momento se mantiene la igualdad de temperatura entre las dos celdas. Cuando la muestra experimenta una transición, los calefactores suministran una energía adicional al material para mantener la misma temperatura entre las dos celdas. La energía suministrada será igual a la energía puesta en juego de la transición y será la energía que se representará en el termograma. En los materiales poliméricos las transiciones térmicas más importantes que pueden presentarse son la temperatura de transición vítrea (T_g) y la temperatura de fusión (T_f).

1.5.4 Espectroscopía de infrarrojo ⁽¹²⁾: Esta técnica espectroscópica de absorción analiza la interacción de la energía de los niveles vibracionales de los enlaces covalentes con la radiación infrarroja. Por tanto es una técnica que pone de manifiesto los grupos funcionales existentes en un compuesto. En general los espectros se expresan en tanto por ciento de transmitancia en función de la longitud de onda.

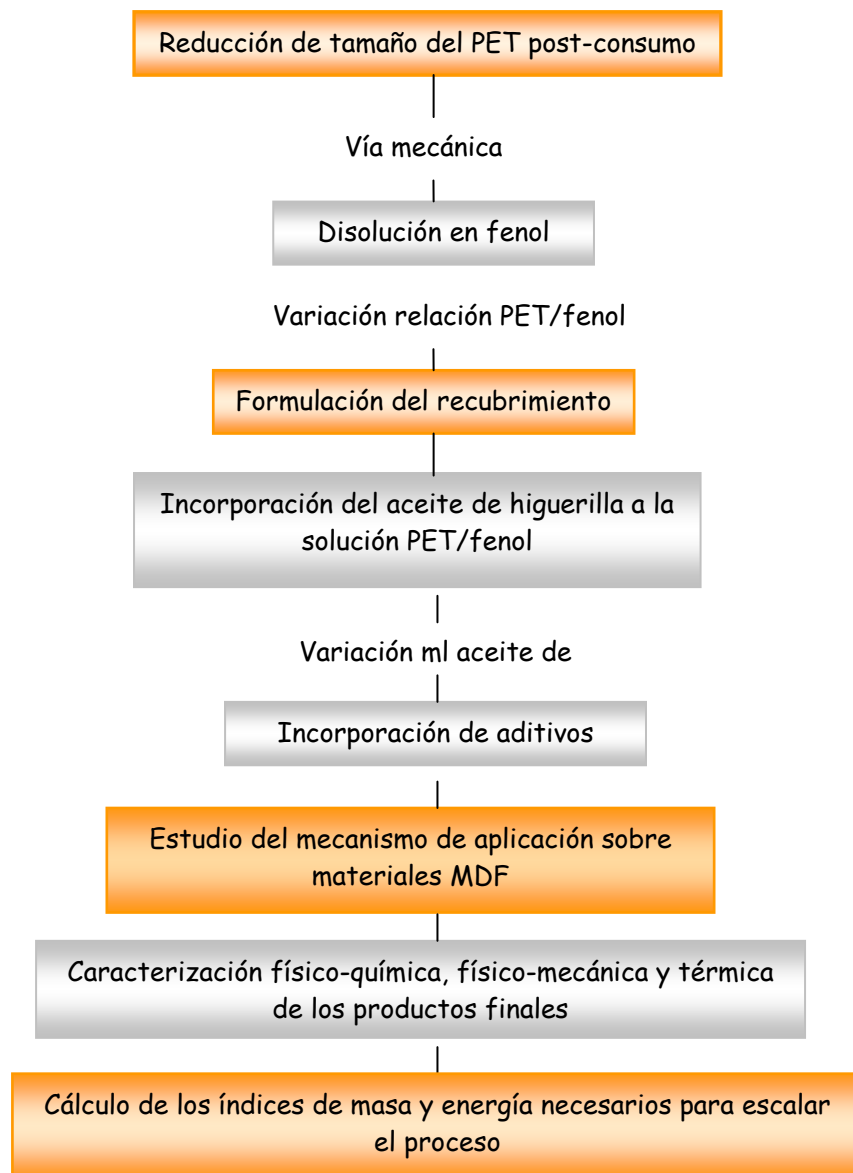
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el procedimiento experimental llevado a cabo desarrollado en la investigación tanto la formulación del recubrimiento como la caracterización del mismo y el cálculo de los índices de masa y energía.

2.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 6, se esquematiza de manera simplificada la metodología del trabajo experimental desarrollado.

Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología experimental

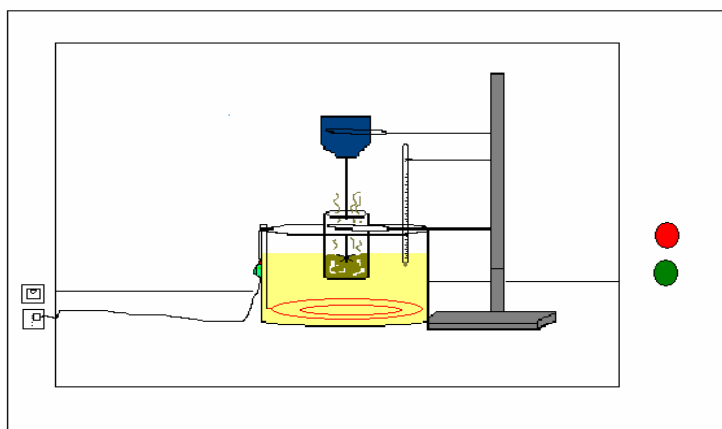


2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.2.1 Reducción de tamaño del PET post-consumo. Debido al alto consumo energético del molino de cuchillas para disminuir de tamaño el PET post-consumo, ubicado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, se decidió adquirir el material pulverizado por medio de una empresa dedicada al reciclaje de PET. El valor del kilo de PET pulverizado fue de \$1400 pesos.

2.2.2 Disolución de PET en fenol. Se realizaron disoluciones teniendo en cuenta la relación g PET/ ml fenol, la temperatura a la cual el PET disolvía y el tiempo de agitación (ver tabla 2). Se utilizó un baño de aceite, termómetro, agitador mecánico y reactor de vidrio de 250 ml (ver figura 6). El fenol utilizado en esta experimentación, es fenol residual de la refinería de Barrancabermeja donado por ECOPETROL S.A.

Figura 7. Montaje para la reacción



➤ **Formulación del recubrimiento.** En esta etapa se tuvieron en cuenta los resultados reportados por Hernández Mónica y Orjuela Miguel⁽⁷⁾. Quienes desarrollaron los recubrimientos a partir de PET post-consumo a nivel laboratorio. Sin embargo, la diferencia en la calidad de algunos reactivos, obligaron a encontrar nuevas condiciones de operación y tomar algunas determinaciones. El montaje utilizado para llevar a cabo las reacciones es el mismo descrito en el numeral 2.2.2.

2.2.3 Incorporación del aceite de higuera a la solución PET/fenol. La incorporación del aceite de higuera se llevó a cabo durante el proceso de disolución del PET en fenol.

2.2.4 Incorporación de aditivos. La incorporación de aditivos se realizó durante la reacción de la solución PET/fenol con TDI.

2.2.5 Estudio del mecanismo de aplicación. Se estudiaron principalmente dos mecanismos de aplicación, el primero utilizando laminas de vidrio para la dispersión del recubrimiento sobre el pieza de MDF y el segundo utilizando una prensa hidráulica.

2.2.6 Caracterización de los recubrimientos. Las propiedades físico-químicas, físico-mecánicas y térmicas de los recubrimientos se determinaron a partir de los ensayos y análisis mencionados a continuación:

Propiedades físico-mecánicas:

- Dureza Shore A, según la norma ASTM D 785. Medida con un durómetro calibrado para tal fin.
- Absorción de agua, según la norma ASTM D 1037. En este ensayo se utilizaron probetas de MDF de 5x5x0.09 cm, recubiertas y sin recubrir. Se sumergieron completamente en agua destilada durante 24 horas. La masa de las probetas fue medida antes y después de la inmersión en agua, de acuerdo con el método B descrito en dicha norma.
- Resistencia al impacto, según la norma ASTM D 256. Esta prueba se realizó en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química (UIS-Santander). Las probetas sometidas al ensayo con y sin recubrimiento, fueron preparadas de manera que su espesor fuera idéntico (3 mm).
- Adherencia, según la normas ASTM DC 633. Esta prueba se llevo a cabo en el Laboratorio de Biohidrometalurgia, ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará (Piedecuesta-Santander). Para medir el esfuerzo de adherencia se utilizó el equipo denominado Maquina de Tracción Lenta⁽¹⁹⁾. Se prepararon probetas con un recubrimiento circular de 20mm de diámetro, se lijó en seco la

superficie de estas y de los dollies (dispositivo encargado de halar el recubrimiento) con lija #800, luego se removió las impurezas con agua y jabón en polvo, mediante una paño y se eliminó la grasa de las superficies con algodón mojado en acetona. El dolly y el recubrimiento se adhirieron utilizando welding epoxi (UNIFIX). Finalmente, se calibró el equipo para el intervalo de trabajo y se evaluó los recubrimientos incrementando la carga 0.017mm/s, hasta que ocurriera la fractura total (máximo esfuerzo de adhesión).

➤ Espesor, se midió por diferencia de espesores utilizando un calibrador vernier. Inicialmente se midió el espesor del MDF sin recubrimiento y luego el espesor del MDF recubierto. Finalmente se reportó el resultado

Propiedades físico-químicas:

➤ Resistencia al ataque químico, según norma ASTM D543-87, a temperatura ambiente (25 +/- 2°C). Los agentes escogidos para la prueba fueron: Gasolina, tetracloruro de carbono, benceno, fenol, éter dietílico y ácido clorhídrico. Además se utilizaron las siguientes sustancias domésticas: agua, detergente, aceite y jabón.

Propiedades térmicas:

➤ Análisis Termogravimétrico. Se realizó mediante un analizador termogravimétrico TA 2050, marca TA instruments. La velocidad de prueba fue de 10°C/min, en un rango de temperatura de 80-700 °C, bajo una atmósfera de nitrógeno.

➤ Calorimetría diferencial de barrido. Se llevó a cabo en un calorímetro DSC Q10, marca TA instruments, a una velocidad de prueba de 10°C/min, en un rango de temperatura de 30-550 °C, utilizando el método vidrio.

Espectrofotometría de infrarrojo: Los espectros de IR se determinaron en un espectrofotómetro de infrarrojo FT-IR 8400s, marca Shimadzu.

2.2.6 Cálculo de los índices de masa y energía. El cálculo de estos índices, necesarios para escalar el proceso, se realizó haciendo uso de los balances de masa y energía, utilizando los datos obtenidos a través de esta investigación.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Este capítulo presenta las condiciones de trabajo y los resultados obtenidos del procedimiento experimental descrito en el anterior capítulo, con sus correspondientes análisis.

3.1 DISOLUCIÓN DE PET EN FENOL. Las condiciones de operación para llevar a cabo la disolución fueron las siguientes:

- Temperatura de disolución completa 160 +/-2 °C
- Tiempo de agitación 5min. La agitación, que debía ser aplicada una vez el fenol había atacado en su mayoría al PET para evitar salpicaduras.

Tabla 2. Relación PET/fenol proceso de disolución.

Relación PET/Fenol *(% p/v)	Tiempo de disolución (min)	Observaciones
30	13	Disolución completa, solución fluida.
35	15	Disolución completa, solución fluida.
45	20	Disolución completa, solución fluida.
55	23	Disolución completa, solución altamente viscosa.
70	25	No disolvió completamente.

*Gramos de PET post-consumo por ml de fenol.

En todos los casos la viscosidad no pudo ser medida debido a la naturaleza de la disolución (altamente tóxica y muy sensible al cambio de temperatura, ya que su disminución, provocaba la solidificación de la solución, como se observa en la figura 8), y el equipo necesario para su medición no podía ser desplazado al lugar de experimentación. Por lo tanto se escogió la disolución que presentaba las mejores condiciones para la formulación del recubrimiento, utilizando la mayor cantidad de PET post-consumo posible. Por lo anterior la solución escogida fue la de 45% p/v PET/fenol, mostrada en la figura 9.

Figura 8. Solución PET/fenol a 25°C



Figura 9. Solución PET/fenol a 160°C



3.2 FORMULACIÓN DEL RECUBRIMIENTO. Las consideraciones tomadas en cuenta para la formulación de los recubrimientos fueron las siguientes:

- Se decidió no utilizar catalizador (octoato de estaño), ya que la reacción debía realizarse a altas temperaturas (temperatura de disolución del PET post-consumo en fenol, 160 °C) lo que favorecía la velocidad de la reacción.
- La cantidad de TDI utilizado para llevar a cabo la reacción, no pudo ser calculada a partir de la norma ASTM 1957-86, debido a que esta norma sugiere que todos los reactivos sean de tipo analítico; y es probable que la cantidad encontrada mediante esta prueba, difiriera significativamente de la cantidad necesaria de TDI comercial (adquirido a Espumas Santander S.A). Por lo tanto, esta se determinó teniendo en cuenta los siguientes aspectos: a) se debía utilizar la menor cantidad de TDI posible de manera que el contenido de isocianatos libres en el producto final no superara los 0.02 ppm⁽³⁾; pero teniendo presente que típicamente los recubrimientos poliuretánicos requieren exceso de isocianatos⁽¹¹⁾ y c) el producto final debía ser resistente y de buena calidad.

Se obtuvo recubrimientos muy quebradizos, y con un evidente exceso de fenol utilizando cantidades superiores e inferiores a 10 ml de TDI, respectivamente. De esta manera, se escogieron las mejores condiciones de reacción, que se mantuvieron durante toda la experimentación.

Para recubrir una pieza de MDF de 100cm², eran necesarios:

- 50ml de solución PET/fenol al 45% p/v
- 10ml de TDI
- Temperatura de reacción 160 +/- 5°C
- Tiempo de agitación 5min.

3.2.1 Incorporación del aceite de higuera a la solución pet/fenol. Se varió la cantidad de aceite de higuera así: 0.4ml, 0.6ml y 1.0 ml por cada 50ml de solución PET/fenol. Se observó que cantidades superiores a 1.0 ml, daban como resultado recubrimientos blandos, con % de dureza Shore A entre 20 - 30, y largos tiempos de curado, por lo tanto fueron descartados.

3.2.2 Incorporación de aditivos. Estos se adicionaron con el fin de mejorar la resistencia al impacto y darle color al poliuretano Sin embargo, el PVA y el Carbonato de calcio fueron descartados como se detalla en la tabla 3.

Tabla 3. Incorporación de aditivos

Aditivos	Observaciones
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	Se probaron cantidades entre 0.1-0.01g. En todos los casos la viscosidad se aumentó significativamente, dificultando su aplicación como lo muestra la figura 10.
Alcohol polivinílico (PVA)	Se usaron cantidades entre 1.0-0.3 g. En todos los casos la viscosidad aumentó, dificultando su aplicación y se observaron gránulos en el recubrimiento, como se puede observar en la figura 11.
Colorante	Anilina de color azul, rojo escarlata y naranja (0.5 g) (ver anexo G)

Figura 10. Aditivo: Carbonato de calcio

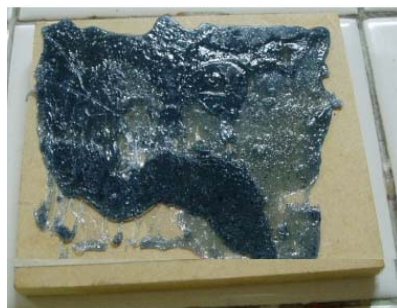
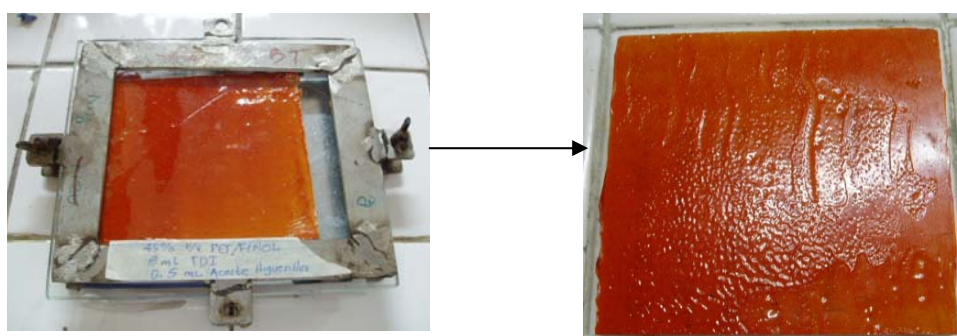


Figura 11. Aditivo: Alcohol polivinílico



3.3 ESTUDIO DEL MECANISMO DE APLICACIÓN. La aplicación debía ser realizada dentro de la cámara de extracción para evitar los vapores. Para esto, inicialmente se utilizó una lámina de vidrio recubierta de silicona, obteniendo un laminado de excelente apariencia y espesor delgado como la observada en la figura 12; sin embargo, debido a la no uniformidad de la presión aplicada, la cual dependía de la fuerza empleada por el operador, este mecanismo se descartó.

Figura 12. Prensado con láminas de vidrio



Por lo anterior se decidió utilizar la *prensa hidráulica*, ubicada en el laboratorio de operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química; sin embargo, como se mencionó anteriormente la aplicación de la resina no podía realizarse por fuera de la cámara de extracción. Por lo tanto, se decidió utilizar laminas de acero inoxidable calibre 18, para transportar las placas de MDF recubiertas. Luego se introducían a la prensa, obteniendo laminados impermeables sobre MDF de espesor menor a 1 mm, aplicando una presión de 570 psi, cabe mencionar que por encima de esta presión se causaba daños en el material MDF. El proceso de prensado duraba aproximadamente de 15 min. Al cabo de este tiempo era posible retirar las placas de acero sin dañar la superficie del recubrimiento. Finalmente se dejaba curar el polímero a temperatura ambiente durante 48 horas. El anterior procedimiento se puede observar en la serie de fotografías de la figura 13.

Figura 13. Mecanismo de aplicación



Temperatura de aplicación 160 °C



Placas de acero calibre 18



Prensado temperatura ambiente (23 +/- 2 °C)



Presión 570 psi



Tiempo de curado 48 h
Temperatura ambiente (23 +/- 2°C)

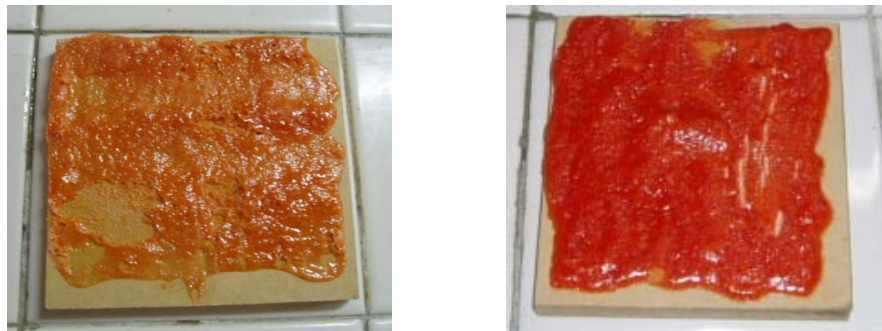


Recubrimiento final

Se intentó prensar a temperaturas superiores a la temperatura ambiente, sin embargo, se observó que el aumento de temperatura producía vapores en el proceso de prensado, los cuales no podían ser evacuados, ya que la prensa se encuentra al aire libre y no podía ser introducida dentro de la cámara de extracción.

Debido a que el TDI disponible para la reacción de los recubrimientos es propio para la fabricación de espumas, el proceso de curado no pudo realizarse a temperaturas superiores a la ambiente, por que los recubrimientos espumaban tal como se muestra en la figura 14. Por lo tanto se decidió curar durante 48 horas a temperatura ambiente.

Figura 14. Curado a temperaturas mayores a la ambiente



Uno de los problemas más comunes en la industria de los recubrimientos de poliuretanos, se presenta en el proceso de curado. El isocianato en exceso reacciona con la humedad del ambiente formando pequeños orificios en la superficie del material. Este fenómeno no fue ajeno a este trabajo de investigación y se puede percibir en la figura 13. Para contrarrestar este inconveniente, en la industria se utilizan mecanismos como el curado bajo rayos ultravioleta.

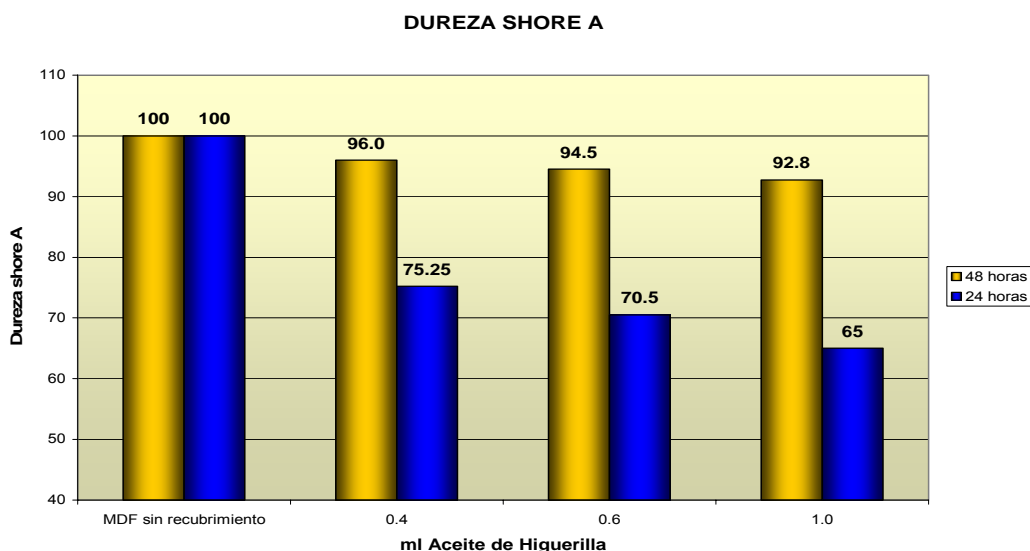
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POLIURETÁNICOS

3.4.1 Caracterización físico-mecánica.

➤ **Dureza:** el mayor porcentaje de dureza Shore A encontrado luego de 48 horas de curado fue de 96, que corresponde al recubrimiento con la menor cantidad de aceite de higuera. En la figura 15, se puede observar claramente una relación indirectamente proporcional de la dureza con respecto al contenido de aceite de higuera y una directamente proporcional con el tiempo de curado.

Es posible que este comportamiento se deba al efecto plastificante del aceite. Sin embargo, hay que resaltar que el porcentaje de dureza obtenido en todos los casos, está dentro del rango encontrado para recubrimientos industriales disponibles en el mercado.

Figura 15. Porcentaje de dureza vs. ml aceite de higuera



➤ **Absorción de agua:** Para todas las piezas de MDF recubiertas, el porcentaje de absorción de agua fue $\leq 0.01\%$. Como se observa en la tabla 4, el recubrimiento con el mayor contenido de aceite de higuera presenta el menor porcentaje de absorción. Esto puede suceder debido a las largas cadenas del ácido graso, que le imparte características no polares a los

polímeros de uretano, las cuales se ven reflejadas en su buena resistencia al agua. También, se observa que el MDF sin recubrimiento alcanza porcentajes de absorción mayores al 40%, lo que disminuye su tiempo de vida útil, pues es fácilmente atacado por la humedad.

Tabla 4. Determinación porcentaje de absorción de agua.

Aceite higuera (ml)	A	B	C
0.4	28.467	28.470	0.01
0.6	27.472	27.474	0.01
1	29.438	29.439	0.00
MDF sin recubrimiento	14.778	20.877	41.27

Donde,

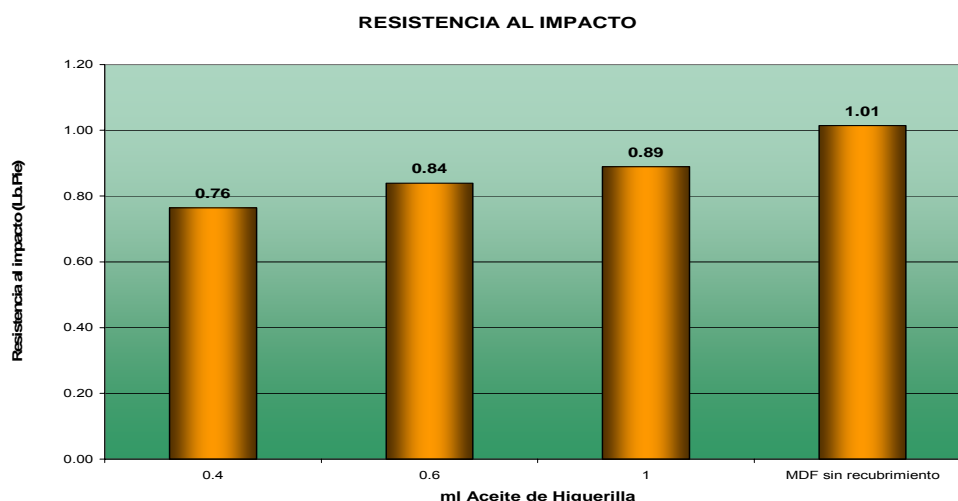
A peso antes de sumergir (g).

B peso después de 24 horas de sumergido (g).

C absorción (%).

➤ **Resistencia al impacto:** En la figura 16, se observa que la resistencia al impacto es directamente proporcional al contenido de aceite de higuera. Esto sucede debido a la flexibilidad que el aceite de higuera le proporciona al polímero. Sin embargo, es posible que debido a los agentes espumantes del TDI utilizado, se formaran pequeñas burbujas de aire en la estructura del recubrimiento, debilitándola y obteniendo bajas resistencias al impacto en comparación con la resistencia al impacto del MDF sin recubrimiento.

Figura 16. Resistencia al impacto vs. ml aceite de higuera

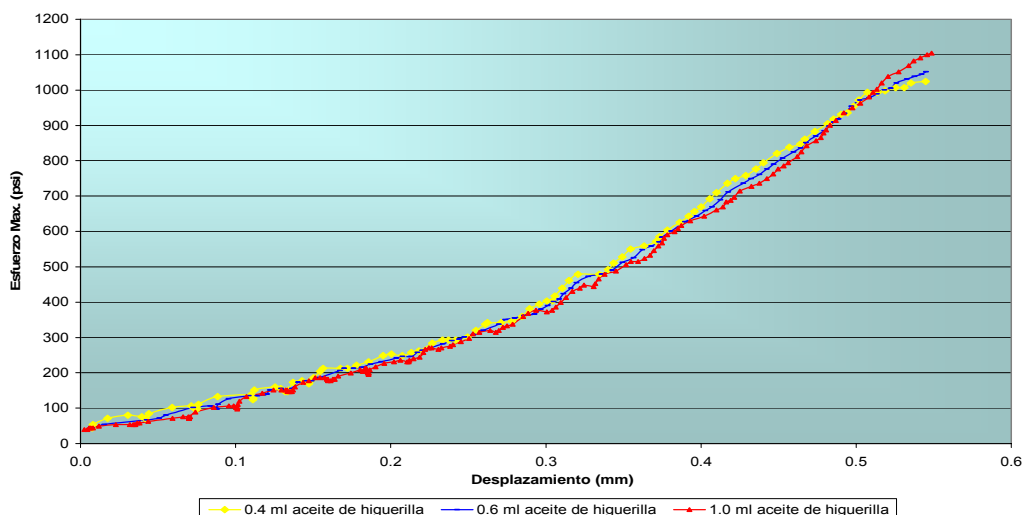


➤ **Adherencia:** La adherencia, medida como el máximo esfuerzo aplicado para desprender el recubrimiento del sustrato, en este caso MDF, se encontró directamente proporcional con el contenido de aceite de higuera, alcanzando valores superiores a 1104 psi, para recubrimientos con un contenido de aceite de 1ml. Los datos se encuentran detallados en la tabla 5.

Además, se observa que el polímero presenta un comportamiento elastomérico, desplazándose casi dos veces su espesor antes de fallar sin presentar una región de deformación plástica, tal como lo muestra la figura 17.

Figura 17. Gráfica de los datos obtenido de adherencia

ADHERENCIA



Como se mencionó anteriormente el aceite de higuera le confiere flexibilidad al polímero y a la vez actúa como plastificante, lo cual da como resultado su comportamiento elastomérico y para el recubrimiento con la mayor cantidad de aceite una adherencia significativamente superior con respecto a los de 0.4 y 0.6 ml.

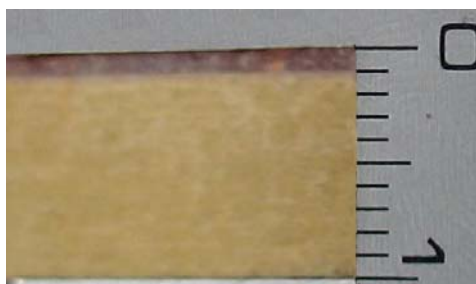
Tabla 5. Datos de adherencia

Aceite de higuera (ml)	Esfuerzo máximo (psi)	Observaciones
0.4	1025	Desprendió
0.6	1051	Desprendió
1.0	1104	No desprendió

El ensayo se realizó a 26.6 °C y humedad relativa 83.07 %

➤ **Espesor:** Aprovechando la uniformidad de la superficie del MDF y del recubrimiento, se midió el espesor mediante un calibrador vernier por diferencia de espesores, encontrando un espesor de 0.7 mm como se puede observar en la figura 18.

Figura 18. Fotografía a escala del espesor del recubrimiento.



3.4.2 Caracterización físico-química.

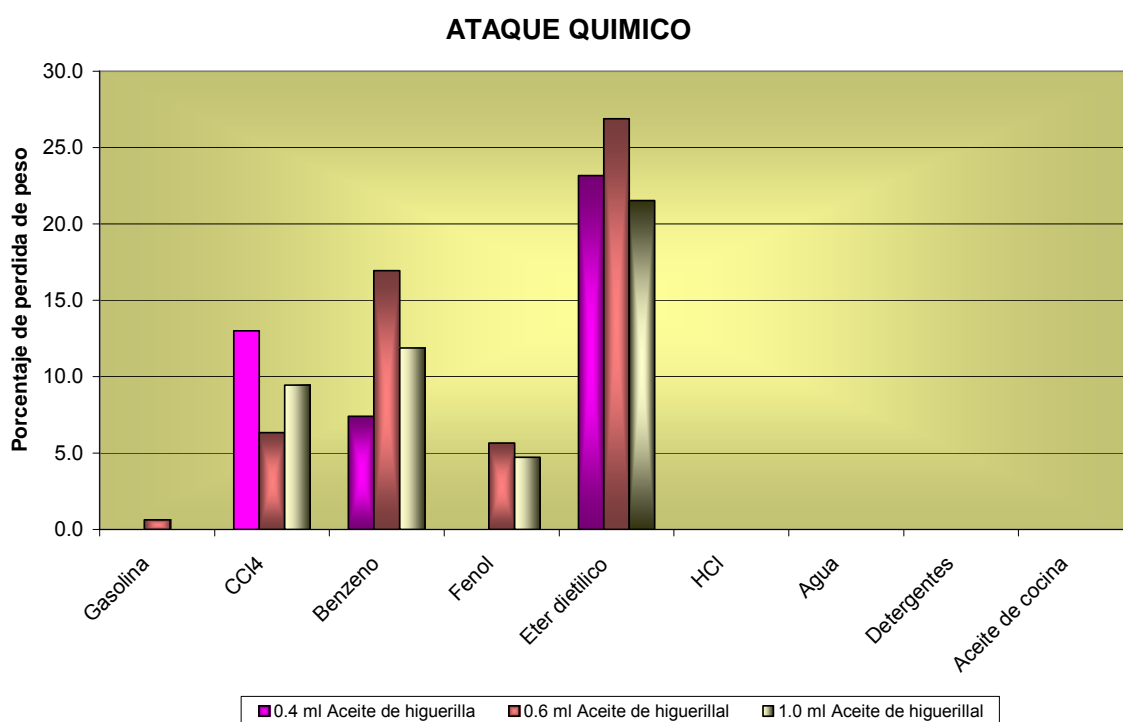
➤ **Ataque químico:** En el caso de las sustancias domésticas (agua, detergente, aceite y jabón) no se observó ningún cambio físico en el material. En cuanto a los agentes químicos, se realizaron las siguientes observaciones, consignadas en la tabla 6.

Tabla 6. Observaciones del ensayo de ataque químico.

Agente químico	Observaciones
Gasolina	No presenta cambio de color ni hinchamiento.
CCl ₄	Se presenta una mayor decoloración. Material frágil. No hubo hinchamiento.
Benzeno	Se presenta decoloración. Material frágil. No hubo hinchamiento.
Fenol	No presenta decoloración. El material poliuretánico se fragmento totalmente.
Éter dietílico	Se presenta decoloración. Material frágil. No hubo hinchamiento.
HCl	No presenta cambio de color ni hinchamiento. Material frágil.

Como se observa en la figura 19, el éter dietílico causó el mayor porcentaje de pérdida de peso, especialmente para el recubrimiento con un contenido de aceite de 0.6 ml. En cuanto al HCl y la gasolina el porcentaje de pérdida de peso fue aproximadamente 0.0%; sucediendo lo mismo con el de 0.4 ml de aceite en presencia de fenol.

Figura 19. Gráficas del Ataque Químico



Es evidente, que debido a su naturaleza polar, los recubrimientos se ven afectados en mayor proporción por agentes polares como el éter dietílico, el fenol y el benceno, aumentando su fragilidad y % porcentaje de pérdida en peso.

En general, los recubrimientos presentan muy buenas características de resistencia al ataque de diferentes sustancias domésticas y algunos agentes químicos, obteniendo porcentajes de pérdida peso menores al 30% y en algunos casos sin presentar cambios drásticos en su estructura física.

3.4.3 Análisis térmico:

➤ **Análisis termogravimétrico:** Los termogramas obtenidos (ver anexo E) muestran cuatro etapas de pérdida de masa detalladas en la tabla 4. La primera corresponde a la pérdida de agua ocluida, aceite de higuera y el fenol residual, luego se observa un proceso rápido en el cual se pierde, aproximadamente, entre un 40 y 60% de la masa (~ 270 °C), posiblemente debido a la pérdida del TDI en exceso y a una serie de reacciones propias del sistema uretano (formación de urea y alofanatos)⁽¹³⁾, luego se presenta otro proceso de degradación alrededor de los 400 °C, el cual concuerda con el termograma del PET comercial, por lo tanto es posible que este intervalo de pérdida de peso corresponda a la pérdida del PET presente en la estructura. Finalmente, se observa otro proceso que quizá se relacione con la degradación de una estructura cristalina compacta del tipo carbodiimida (~N=C=N~), que puede formarse en un proceso de degradación⁽¹³⁾. En dichos termogramas (ver anexo C), se observa que el recubrimiento que presenta una mayor resistencia a la temperatura antes de empezar el proceso de degradación es el formulado con 0.4 ml de aceite, también se encontró que a medida que el contenido de aceite de higuera aumenta el % residuo disminuye como se presenta en la tabla 7. De acuerdo con los resultados obtenidos y los reportados en la referencia 7, el uso del material se restringe a un intervalo de temperatura entre 0-90 °C aprox.

Tabla 7. Análisis termogravimétricos

Aceite de higuera (ml)	Rango de Temperatura (°C)	% pérdida de peso	Residuo %
0.4	90 - 182	3.33	19.31
	182 - 270	44.67	
	270 - 395	67.33	
	395 - 548	80.69	
0.6	80 - 162	4.00	14.80
	162 - 249	47.33	
	249 - 403	60.00	
	403 - 518	87.14	
1.0	82 - 170	2.67	5.263
	170 - 268	56.00	
	268 - 402	66.00	
	402 - 464	94.76	

➤ **Calorimetría diferencial de barrido:** En los termogramas (ver anexo F), se muestran los resultados de caracterización, mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). En el intervalo de temperatura medido, los materiales poliuretánicos presentan un pico endotérmico bien definido entre 200 y 250 °C, que posiblemente corresponda a su temperatura de transición vítrea (T_g). Los picos encontrados para los recubrimientos formulados con 0.4, 0.6 y 1.0 ml de aceite de higuera son respectivamente 248.63 ,208.22 y 242.98 °C.

3.4.4 Espectroscopía de infrarrojo: En los espectros FTIR obtenidos (ver anexo E), se muestran las señales características de este tipo de polímero⁽¹²⁾.

- N-H uretano a 3360 cm^{-1}
- C=O a $1760\text{-}1740\text{ cm}^{-1}$
- Flexión N-H y N-C-H a $1530\text{-}1510\text{ cm}^{-1}$

Además de las otras señales propias del sistema aromático; que comparadas con los espectros FTIR de las materias primas utilizadas tales como el PET post-consumo, el fenol residual y el TDI comercial, muestran grandes diferencias entre las señales. Esta es la demostración de que el material obtenido es posiblemente un poliuretano.

4. CÁLCULO DE ÍNDICES DE MASA Y ENERGÍA

Teniendo en cuenta los resultados encontrados y según los análisis realizados anteriormente, para el cálculo de los índices de masa y energía, se escogió el recubrimiento formulado con 1.0 ml de aceite de higuera, por ser el que presentaba en general, las mejores características físicas, químicas y térmicas.

Como unidad de referencia se definió el área de MDF recubierto.

4.1 CÁLCULO DE ÍNDICES DE MASA

Para el cálculo del índice de masa de las sustancias utilizadas, se determinaron las densidades de las mismas, reportadas en la siguiente tabla:

Tabla 8. Reporte de densidades

Sustancia	Volumen (ml)	Peso (g)	Densidad (g/ml)
TDI comercial	14	16.33	1.1664
Fenol residual	19	19.26	1.0137
Aceite de higuera ⁽⁵⁾	-	-	0.9576
Recubrimiento	1.8	2.11	1.1722

A continuación, se mencionan las cantidades necesarias para la formulación del recubrimiento, para una pieza de MDF de 100 cm²

- 22.5 gramos de PET post-consumo
- 50 ml de fenol residual
- 10 ml de TDI
- 1 ml de aceite de higuera

Tomando como unidad de referencia 100 cm² de pieza recubierta se tiene:

● **Índice de masa del PET:**

$$I_{\text{PET}} = \frac{\text{masa PET}}{\text{Unidad de referencia}} = \frac{22.5 \text{ g}}{100 \text{ cm}^2} = 0.225 \text{ g/cm}^2$$

● **Índice de masa del fenol:**

$$I_{\text{fenol}} = \frac{\text{masa fenol}}{\text{Unidad de referencia}} = \frac{.0137\text{g/ml} \times 50 \text{ ml}}{100 \text{ cm}^2} = 0.50685 \text{ g/cm}^2$$

● **Índice de masa del TDI, tipo comercial:**

$$I_{\text{TDI}} = \frac{\text{masa TDI}}{\text{Unidad de referencia}} = \frac{(1.1064\text{g/ml}) \times 20\text{ml}}{100 \text{ cm}^2} = 0.22128 \text{ g/cm}^2$$

● **Índice de masa del aceite de higuera:**

$$I_{\text{AH}} = \frac{\text{masa aceite}}{\text{Unidad de referencia}} = \frac{(0.9576\text{g/ml}) \times 1 \text{ ml}}{100 \text{ cm}^2} = .009576 \text{ g/cm}^2$$

4.2 CÁLCULO DE ÍNDICES DE ENERGÍA

Para calcular los índices de energía se deben tener en cuenta los 2 tipos de energía utilizados para recubrir 100 cm² de MDF (unidad de referencia). Estas son: La energía térmica y la energía mecánica.

● **Índice de energía térmica**, este índice se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$I_Q = \frac{\text{energía}}{A_{\text{rec}}} = \frac{\sigma V C_p \Delta T}{A_{\text{rec}}}$$

Donde,

I_Q : Índice de energía térmica [=] J/cm²

σ : Densidad del aceite mineral , 900 kg/m³

V : Volumen de aceite mineral , 0.00125 m³

Cp ⁽⁸⁾: Capacidad calorífica del aceite mineral, 555.65 J/(kg*K)

ΔT: Delta de temperatura del baño de aceite, 137 K

A_{rec}: Área del MDF recubierta (100 cm²), (unidad de referencia)

Remplazando,

$$I_Q = \frac{(900\text{kg/m}^3)(0.00125\text{m}^3)(555.65\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))(137)}{100\text{ cm}^2} = 856.39\text{ J/cm}^2$$

De acuerdo a la ecuación anterior, la energía térmica necesaria para recubrir un cm² de MDF bajo las condiciones mencionadas anteriormente es **856.39 J**

● **Índice de energía mecánica**, para el cálculo del índice de energía mecánica se deben tener en cuenta tanto la energía debida a la agitación como la necesaria para llevar a cabo el proceso de prensado.

Tomando en cuenta lo anterior el índice de energía mecánica será:

$$I_{EM} = I_{EPH} + I_{EA}$$

Donde,

I_{EM}, índice de energía mecánica

I_{EPH}, índice de energía de la prensa hidráulica

I_{EA}, índice de energía del agitador mecánico

Para el cálculo del índice de energía de la prensa hidráulica se empleo la siguiente ecuación:

$$I_{EPH} = \frac{P\Delta V}{\text{Unidad de referencia}}$$

Donde,

P: es la presión registrada en el manómetro de la prensa, 570 psi (3930kPa).

ΔV: es volumen desplazado de aceite (1.725 m³).

PΔV: trabajo realizado por el fluido (aceite) sobre el sistema.

Remplazando,

$$I_{EPH} = \frac{(3930\text{kPa})(1.725\text{m}^3)}{100 \text{ cm}^2} = 67.79 \text{ kJ/cm}^2$$

En cuanto al cálculo del índice energético del agitador mecánico, se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$I_{EA} = \frac{P_a \Theta}{\text{Unidad de referencia}}$$

Donde,

P_a : Potencia del agitador, 52.198 kW

Θ : 600 s (300 s, agitación sln PET/FENOL; 300 s, agitación reacción)

Reemplazando en la ecuación de índice energético del agitador mecánico tenemos:

$$I_{EA} = \frac{(52.198\text{kW})(600\text{s})}{100 \text{ cm}^2} = 313.19 \text{ kJ/cm}^2$$

Así el índice de energía mecánica es igual a:

$$I_{EM} = 67.79 \text{ kJ/cm}^2 + 313.19 \text{ kJ/cm}^2 = 380.98 \text{ kJ/cm}^2.$$

Por lo tanto, la energía mecánica necesaria para recubrir un cm^2 de MDF bajo las condiciones mencionadas anteriormente es **380.98 kJ**.

5. CONCLUSIONES

Se determinaron las condiciones requeridas para escalar a nivel piloto el proceso de obtención de recubrimientos impermeables sobre materiales MDF, empleando PET post-consumo, fenol residual, TDI comercial y aceite de higuera, obteniendo el mejor recubrimiento para el formulado con 1 ml de aceite de higuera ya que presentó en general las mejores características físico-químicas, físico-mecánicas y térmicas, entre las que se destacan su buena resistencia al ataque químico, porcentaje de absorción de agua de 0.0% y un esfuerzo máximo para la prueba de adhesión mayor a 1104 psi.

Mediante la elaboración de recubrimientos poliuretánicos impermeables, es posible dar mayor valor agregado tanto a los desechos del PET y el fenol residual como al MDF, aumentando la vida útil de este último. En cuanto al uso del aceite de higuera es importante destacar que este es un material natural y renovable económicamente.

La elaboración de recubrimientos poliuretánicos a partir de PET post-consumo, es una posible alternativa de solución para el manejo de residuos sólidos plásticos, comparado con algunos mecanismos de reciclaje actuales que son poco eficientes y en los que generalmente se obtienen productos de baja calidad.

Por medio de la *“prensa hidráulica”*, es posible obtener recubrimientos de superficie uniforme, ya que permite la aplicación de una presión homogénea y constante de 570 psi, sobre la superficie del MDF. Además, permite obtener placas MDF recubiertas hasta de 20x20 cm²

6. RECOMENDACIONES

Desarrollar los recubrimientos utilizando TDI comercial sin espumantes y posteriormente incorporar aditivos para mejorar algunas propiedades del material poliuretánico, especialmente su resistencia al impacto.

Estudiar otros mecanismos para la elaboración de recubrimientos a partir de PET post-consumo como la alcoholisis del PET, de manera que se amplíen las posibles líneas de reciclaje del PET post-consumo, en busca de materiales de mayor valor agregado.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARÓN W Y PALACIOS J. Obtención de productos a partir del PET reciclado obtenido de los residuos sólidos urbanos domésticos de Bucaramanga. Bucaramanga, 2001, 83 – 92. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
2. BARRERA Marcy Yadira y MEJÍA Adriana Ivonne. Preparación de nanocompuestos de polímero silicato usando bentonitas colombianas modificadas. Bucaramanga, 2006. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
3. BASF corporation. Poliuretano Manual del TDI. Febrero 2000.
4. CABRERA Juan Manuel y NAVAS Kelly Johanna. Síntesis y caracterización de elastómeros de poliuretano y redes poliméricas interpenetradas (ipns) a partir de polioliol–suspensiones de aceite de higuera y almidón de yuca, y estireno. Bucaramanga, 2005. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
5. CAMARGO Diana Consuelo y NAVAS Daniel. Síntesis y caracterización de polímeros tipo ipn's con base en aceite de higuera modificado, almidón y monómero acrílico. Bucaramanga 2006, Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
6. CHIKARA Kawamura, KEI Ito, REIJIRO Nishida, ICHIRO Yoshihara y NOBUSHIGE Numa. Coating resins synthesized from recycled PET. Progress in Organic Coatings. October 2001.
7. HERNÁNDEZ M Y ORJUELA M. Estudio de las rutas de síntesis de poliuretanos a través de tratamiento químico de Polietilentereftalato, (PET) post-consumo. Bucaramanga, 2004. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.

8. [http:// www.ingenierosdelubricacion.com/articulos/fluidos_ignifugos.htm](http://www.ingenierosdelubricacion.com/articulos/fluidos_ignifugos.htm)
9. [http:// www.monografias.com/pruebasmecanicas](http://www.monografias.com/pruebasmecanicas)
10. INÁCIO DE CAMPOS Cristiane y ROCCO LAHR Francisco Antonio. Caracterización del mdf producido a partir de eucalipto y adhesivo poliuretano natural. *Maderas.Ciencia y tecnología*. 6(1): 73-84, 2004.
11. LEY David, FIORI Dense y Quinn Richard. Optimization of Acrylic Polyols for Low VOC Two-Component Water Reducible Polyurethane Coatings Using Tertiary Isocyanate Crosslinkers. Cytec Industries Inc., 1937 West Main Street, Stamford, CT 06904 USA.
12. MAJÓ ROJA Antonia. Síntesis y Caracterización de Politartaramidas Derivadas de la Lisina. Barcelona, 2003. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Química.
13. MILLÁN Enrique, RAMÍREZ Marvelis y PERDOMO Gilberto. Síntesis de poliésteres-uretano a partir de 1,4-ciclohexanodiol y metileno-bis-4-fenilisocianato. *QUIMICA Acta Científica Venezolana*, 51: 150–159, 2000
14. M. Jasso, H. Krump, I. Hudec, P. St'ahel, D. Kovacik, M. Sira. Coating of PET cords at atmospheric pressure plasma discharge in the presence of butadiene/nitrogen gas mixtures. *Surface & Coatings Technology*. October 2005.
15. MEJÍA Sandra I. La Higuera (Ricinus communis). Universidad Nacional. Bogotá.
16. POLYONE PLASTIC COMPOUNDS AND COLORS GROUP. Polyone launches micro-bead colour masterbatch for PET. *Additives for polymers*, march 2002.

17. PATEL M., PATEL J. Y SINHA, V. Polymeric precursors from PET waste and their application in polyurethane coatings Polymer Degradation and Stability. Febrero 2005.
18. SANTOS A., TEIXEIRA B., AGNELLI J., Y MANRICH S. Caractherization off effluents through a typical plastic recycling process: an evaluation of cleaning performance and environmental pollution. Resources Conservation and Recycling. January 2005
19. TIRADO David Fernando. Estudio de la influencia de las técnicas de deposición corriente directa, corriente pulsante e inversa en la adherencia del cobre sobre zamak y niquel sobre cobre. Bucaramanga 2006, Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
20. XI Guosxi, LU Maixi Y SUN Chen. Study on depolymerization of waste polyethylene terephthalate into monomer of bis (2-hydroxyethyl terephthalate).Polymer Degradation and Stability. Julio 2004
21. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. Evaluating the resistance of plastics to chemical reagents. 2001 (ASTM D 543 – 95).
22. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. Standard methods of test for impact resistance of plastics and electrical insulating materials. 1973 (ASTM D 256 – 73).
23. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. Standard test method for adhesion or cohesion strength of thermal spray coating. (ASTM C 633 - 01)
24. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials (ASTM D 1037 – 99).

ANEXO A. DATOS ENSAYOS DE ADHERENCIA

ADHERENCIA Muestra (0,4 ml aceite de higuera)

Maximo Esfuerzo (Mpa) 7.064595 Temperatura °C 26.6
Observación Desprendió Humedad Relativa % 83.07

TIEMPO	Desplazamiento	Fuerza (N)	Esfuerzo (Mpa)	N/mm
0.000000	0.007400	9.800000	0.305827	1324.324324
0.000000	0.008000	11.760000	0.366992	1469.999930
0.420000	0.017400	15.680000	0.489323	901.149413
0.676000	0.030600	17.640000	0.550488	576.470585
1.129000	0.041700	15.680000	0.489323	376.019168
1.402000	0.041900	15.680000	0.489323	374.224331
2.407000	0.073900	21.560000	0.672819	291.745605
2.620000	0.074400	21.560000	0.672819	289.784945
2.886000	0.075100	21.560000	0.672819	287.083899
3.098000	0.075900	24.500000	0.764567	322.793135
4.086000	0.111200	27.440000	0.856315	246.762596
4.359000	0.111300	28.420000	0.886897	255.345914
5.306000	0.131900	32.340000	1.009228	245.185751
5.736000	0.134200	33.320000	1.039811	248.286128
6.395000	0.147100	37.240000	1.162141	253.161112
6.610000	0.148400	39.200000	1.223307	264.150954
6.826000	0.150400	41.160000	1.284472	273.670217
7.038000	0.154300	45.080000	1.406803	292.158125
7.717000	0.172100	47.040000	1.467968	273.329471
7.929000	0.178000	49.000000	1.529133	275.280894
8.644000	0.200300	55.860000	1.743212	278.881687
9.067000	0.213300	56.840000	1.773795	266.479132
9.555000	0.226900	62.720000	1.957290	276.421335
9.821000	0.233400	64.680000	2.018456	277.120820
10.033000	0.237300	64.680000	2.018456	272.566379
10.247000	0.241900	64.680000	2.018456	267.383220
10.958000	0.260800	74.480000	2.324282	285.582818
11.172000	0.262300	75.460000	2.354865	287.685840
11.651000	0.278100	76.440000	2.385448	274.865143
12.419000	0.295700	87.220000	2.721857	294.961096
12.632000	0.300500	89.180000	2.783022	296.772041
13.116000	0.305700	92.120000	2.874770	301.341180
13.381000	0.310500	97.020000	3.027684	312.463772
14.034000	0.334200	105.840000	3.302928	316.696594
14.288000	0.340100	108.780000	3.394676	319.847113
14.788000	0.349300	116.620000	3.639337	333.867738
15.020000	0.354500	121.520000	3.792250	342.792670
15.710000	0.373300	129.360000	4.036912	346.530953
16.682000	0.395800	145.040000	4.526234	366.447706
16.924000	0.400000	147.980000	4.617982	369.949994
17.151000	0.405600	152.880000	4.770896	376.923066
17.906000	0.422100	165.620000	5.168470	392.371469
18.611000	0.440200	175.420000	5.474297	398.500681
18.853000	0.449000	181.300000	5.657793	403.786191
19.067000	0.457000	185.220000	5.780123	405.295416
19.319000	0.463900	187.180000	5.841289	403.492132
19.587000	0.467000	190.120000	5.933037	407.109201
20.273000	0.485500	202.860000	6.330611	417.837274
20.500000	0.490400	205.800000	6.422359	419.657434
20.720000	0.494400	206.780000	6.452942	418.244341
21.175000	0.501700	214.620000	6.697603	427.785543
21.643000	0.513900	219.520000	6.850517	427.164833
22.852000	0.544800	226.380000	7.064595	415.528647
23.066000	0.547600	226.380000	7.064595	413.403966
23.337000	0.550300	225.400000	7.034012	409.594765
23.549000	0.553200	225.400000	7.034013	407.447573
23.549000	0.553200	225.400000	7.034013	407.447573

ADHERENCIA Muestra (1,0 ml de aceite de higuierilla)

Maximo Esfuerzo (Mpa) 7.615083 Temperatura °C 26.095
Observación No Desprendió Humedad Relativa % 83.07

TIEMPO	Desplazamiento	Fuerza (N)	Esfuerzo (Mpa)	N/mm
0.00	0.002300	8.820000	0.275244	3834.782524
0.00	0.004300	8.820000	0.275244	2051.162721
0.42	0.005500	9.800000	0.305827	1781.818191
0.68	0.006600	9.800000	0.305827	1484.848493
1.13	0.011900	10.780000	0.336409	905.882332
1.40	0.022700	11.760000	0.366992	518.061661
2.41	0.035400	11.760000	0.366992	332.203395
2.62	0.036600	12.740000	0.397575	348.087421
2.89	0.037900	12.740000	0.397575	336.147750
3.10	0.043600	13.720000	0.428157	314.678896
4.09	0.070000	15.680000	0.489323	223.999999
4.36	0.069900	15.680000	0.489323	224.320462
5.31	0.086000	22.540000	0.703401	262.093014
5.74	0.098800	23.520000	0.733984	238.056672
6.40	0.101100	22.540000	0.703401	222.947582
6.61	0.101400	24.500000	0.764567	241.617350
6.83	0.102400	26.460000	0.825732	258.398444
7.04	0.106900	29.400000	0.917480	275.023389
7.50	0.124300	33.320000	1.039811	268.061136
7.72	0.129400	33.320000	1.039811	257.496136
7.93	0.132100	33.320000	1.039811	252.233155
8.64	0.134600	32.340000	1.009228	240.267462
9.07	0.136300	32.340000	1.009228	237.270731
9.56	0.138300	35.280000	1.100976	255.097611
9.82	0.143500	38.220000	1.192724	266.341463
10.03	0.147200	39.200000	1.223307	266.304342
10.25	0.151200	41.160000	1.284472	272.222229
10.96	0.158700	40.180000	1.253889	253.182098
11.17	0.159500	40.180000	1.253889	251.912221
11.65	0.161300	39.200000	1.223307	243.025413
12.42	0.166000	42.140000	1.315055	253.855431
12.63	0.174200	44.100000	1.376220	253.157293
13.12	0.182000	45.080000	1.406803	247.692313
13.38	0.183500	47.040000	1.467968	256.348764
14.03	0.185200	44.100000	1.376220	238.120943
14.29	0.185700	43.120000	1.345637	232.202478
14.79	0.186300	46.060000	1.437385	247.235649
15.02	0.190300	48.020000	1.498551	252.338409
15.27	0.195800	49.980000	1.559716	255.260462
15.71	0.206200	51.940000	1.620881	251.891363
16.68	0.214600	52.920000	1.651464	246.598326
16.92	0.218500	53.900000	1.682047	246.681919
17.15	0.220900	56.840000	1.773795	257.311001
17.41	0.222200	58.800000	1.834960	264.626455
17.67	0.224600	59.780000	1.865543	266.162063
17.91	0.226300	59.780000	1.865543	264.162615
18.61	0.238200	60.760000	1.896125	255.079771
18.85	0.240000	61.740000	1.926708	257.250006
19.07	0.245300	63.700000	1.987873	259.682027
19.32	0.250500	65.660000	2.049038	262.115775
19.59	0.253000	68.600000	2.140786	271.146255
20.50	0.269600	70.560000	2.201952	261.721064
20.72	0.272200	72.520000	2.263117	266.421760

TIEMPO	Desplazamiento	Fuerza (N)	Esfuerzo (Mpa)	N/mm
21.18	0.278500	74.480000	2.324282	267.432684
21.64	0.288400	81.340000	2.538361	282.038840
21.87	0.293600	83.300000	2.599526	283.719353
22.59	0.306400	85.260000	2.660692	278.263707
22.85	0.309600	88.200000	2.752440	284.883725
23.07	0.313000	91.140000	2.844188	291.182115
23.34	0.317000	95.060000	2.966518	299.873815
23.55	0.321800	97.020000	3.027684	301.491616
23.82	0.324600	98.980000	3.088849	304.929133
24.04	0.330900	98.000000	3.058266	296.161970
24.94	0.345200	107.800000	3.364093	312.282733
25.17	0.351700	111.720000	3.486424	317.657087
25.42	0.354800	113.680000	3.547589	320.405875
25.63	0.359400	113.680000	3.547589	316.304949
25.90	0.363500	115.640000	3.608754	318.129299
26.11	0.367200	117.600000	3.669920	320.261449
26.38	0.369500	120.540000	3.761668	326.224618
27.09	0.376200	128.380000	4.006329	341.254660
27.35	0.378300	130.340000	4.067494	344.541359
27.61	0.383000	132.300000	4.128660	345.430822
27.86	0.385000	134.260000	4.189825	348.727281
28.08	0.387200	136.220000	4.250990	351.807853
28.34	0.393000	139.160000	4.342738	354.096686
28.55	0.402000	142.100000	4.434486	353.482578
28.81	0.409900	146.020000	4.556817	356.233219
29.02	0.414100	147.980000	4.617982	357.353304
29.28	0.416200	150.920000	4.709730	362.614117
29.49	0.419200	151.900000	4.740313	362.356868
30.20	0.432400	160.720000	5.015557	371.692887
30.45	0.437600	162.680000	5.076722	371.755039
30.66	0.442500	165.620000	5.168470	374.282490
30.92	0.446500	168.560000	5.260218	377.513995
31.14	0.449800	171.500000	5.351966	381.280557
31.40	0.453400	173.460000	5.413132	382.576104
31.62	0.456200	175.420000	5.474297	384.524328
31.88	0.462100	179.340000	5.596628	388.097815
32.14	0.464700	182.280000	5.688376	392.253055
32.37	0.468000	186.200000	5.810706	397.863252
33.05	0.479100	194.040000	6.055367	405.009402
33.30	0.480600	196.000000	6.116533	407.823554
33.52	0.483000	198.940000	6.208281	411.884049
33.79	0.487000	201.880000	6.300029	414.537997
34.00	0.492000	206.780000	6.452942	420.284541
34.27	0.497500	209.720000	6.544690	421.547737
34.49	0.502800	212.660000	6.636438	422.951482
34.70	0.508200	216.580000	6.758769	426.170807
35.01	0.511000	219.520000	6.850517	429.589060
35.27	0.513400	221.480000	6.911682	431.398504
35.49	0.516400	225.400000	7.034013	436.483363
35.70	0.520600	229.320000	7.156343	440.491723
36.46	0.537100	239.120000	7.462170	445.205720
36.68	0.541500	241.080000	7.523335	445.207779
36.94	0.545900	243.040000	7.584501	445.209756
37.15	0.548600	244.020000	7.615083	444.804943

ANEXO B. DATOS ATAQUE QUÍMICO

DATOS. PORCENTAJE PÉRDIDA DE PESO

SUSTANCIA DE ATAQUE	MUESTRA		
	0.4 ml Aceite de higuera		PORCENTAJE
	Inicial (g)	Final(g)	%
Gasolina	1.54	1.54	0.0
CCl ₄	1.23	1.07	13.0
Benzeno	1.62	1.50	7.4
Fenol	1.69	1.69	0.0
Dietileter	0.82	0.63	23.2
HCl	1.00	1.00	0.0
Agua	1.23	1.23	0.0
Aceite de cocina	2.30	2.30	0.0
Detergentes	2.70	2.70	0.0

SUSTANCIA DE ATAQUE	MUESTRA		
	0.6 ml Aceite de higuera		PORCENTAJE
	Inicial (g)	Final(g)	%
Gasolina	1.57	1.56	0.6
CCl ₄	1.42	1.33	6.3
Benzeno	1.77	1.47	16.9
Fenol	2.12	2.00	5.7
Dietileter	1.19	0.87	26.9
Agua	1.25	1.25	0.0
Aceite	1.94	1.94	0.0
Detergentes	1.65	1.65	0.0
HCl	1.49	1.49	0.0

SUSTANCIA DE ATAQUE	MUESTRA		
	1.0 ml Aceite de higuera		PORCENTAJE
	Inicial (g)	Final(g)	%
Gasolina	1.45	1.45	0.0
CCl ₄	1.48	1.34	9.5
Benzeno	2.19	1.93	11.9
Fenol	2.11	2.01	4.7
Dietileter	1.58	1.24	21.5
Agua	1.10	1.10	0.0
Aceite	2.52	2.52	0.0
Detergentes	1.20	1.20	0.0
HCl	0.99	0.99	0.0

ANEXO C. DATOS RESISTENCIA AL IMPACTO

PARÁMETROS PARA LA CORRECCIÓN DE LA LECTURA DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO

A	B	A-B
1.00	0.60	0.40
0.95	0.65	0.30
0.95	0.60	0.35
0.95	0.60	0.35
0.95	0.65	0.30
0.95	0.65	0.30
1.00	0.65	0.35
(A-B)p PROMEDIO		0.34

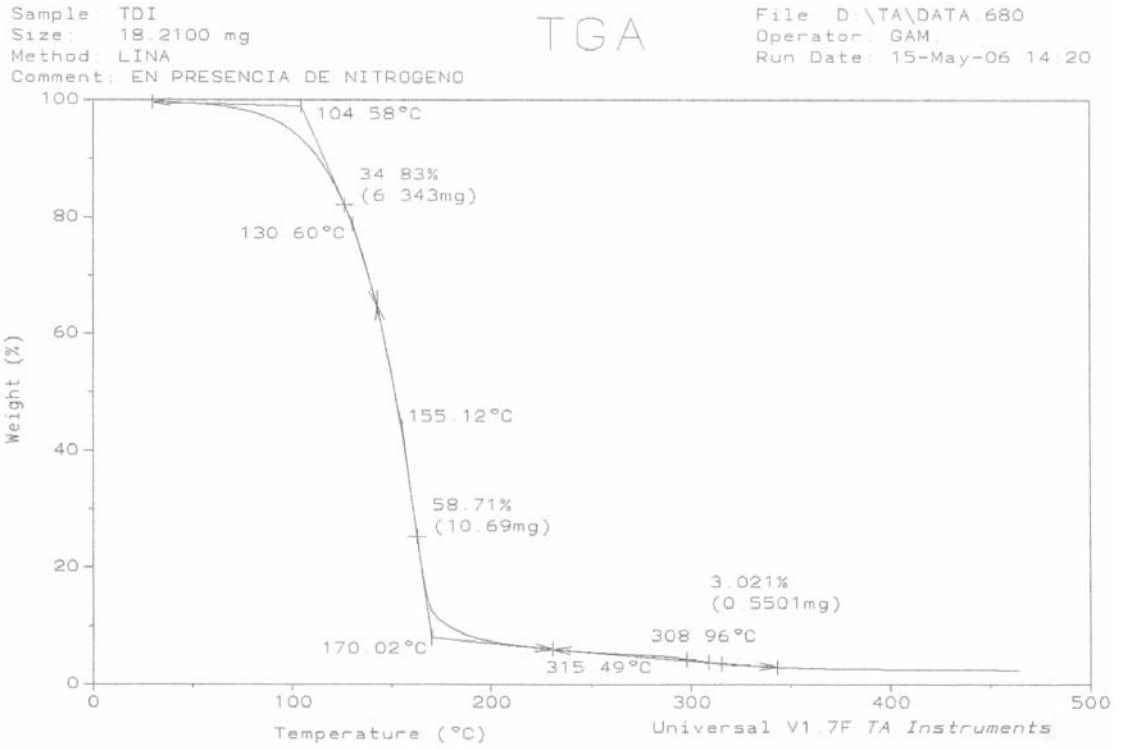
Para medir los parámetros A y B, inicialmente se deja caer el péndulo sin colocar ninguna muestra. El valor que se reporte en el equipo corresponde al parámetro A. Sin hacer ninguna modificación se regresa el péndulo a su posición inicial y se deja caer nuevamente, el nuevo dato reportado corresponde al parámetro B. Finalmente la diferencia de estos, que indica la energía gastada por el péndulo debida a su movimiento, se debe restar para corregir los valores leídos en los posteriores ensayos.

DATOS REPORTADOS

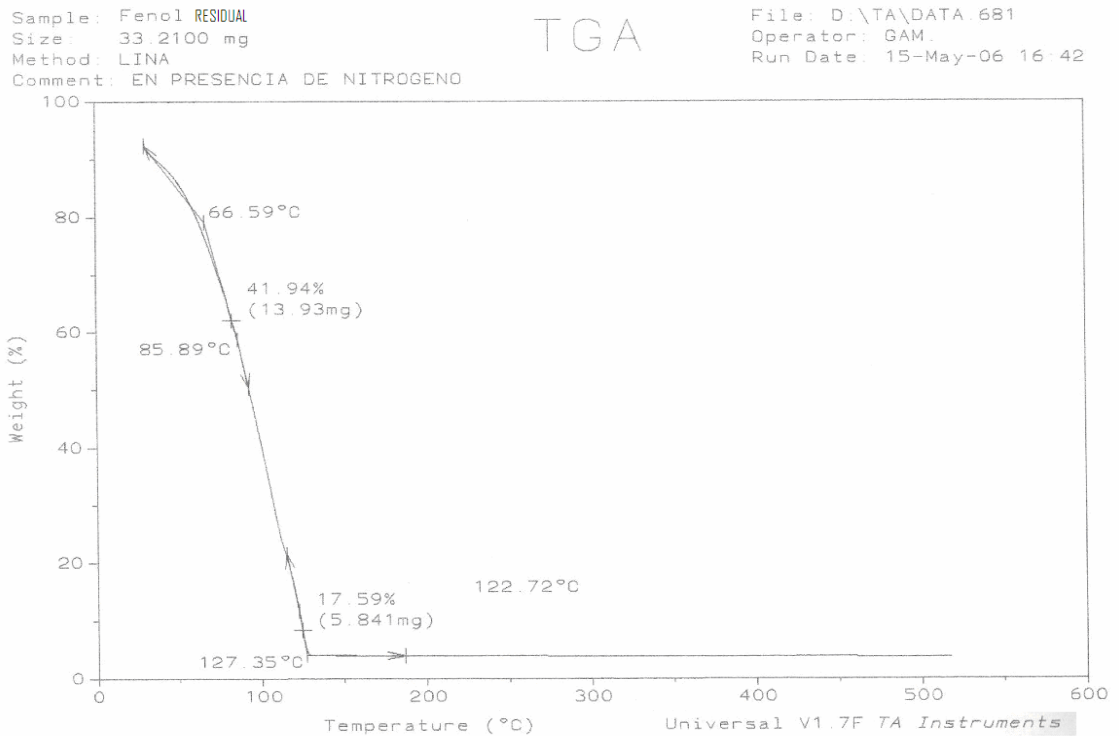
Muestra	ml Aceite de Higuera	Resistencia en Lb.Pie leída				Resistencia al impacto de la muestra Medida-(A-B)p
		1	2	3	promedio	
1	0.4	1.1	1.1	1.1	1.1	0.76
2	0.6	1.2	1.15	1.2	1.175	0.84
3	1	1.25	1.2	1.23	1.225	0.89
Blanco	MDF sin recubrimiento	1.3	1.4	1.35	1.35	1.01

ANEXO D. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

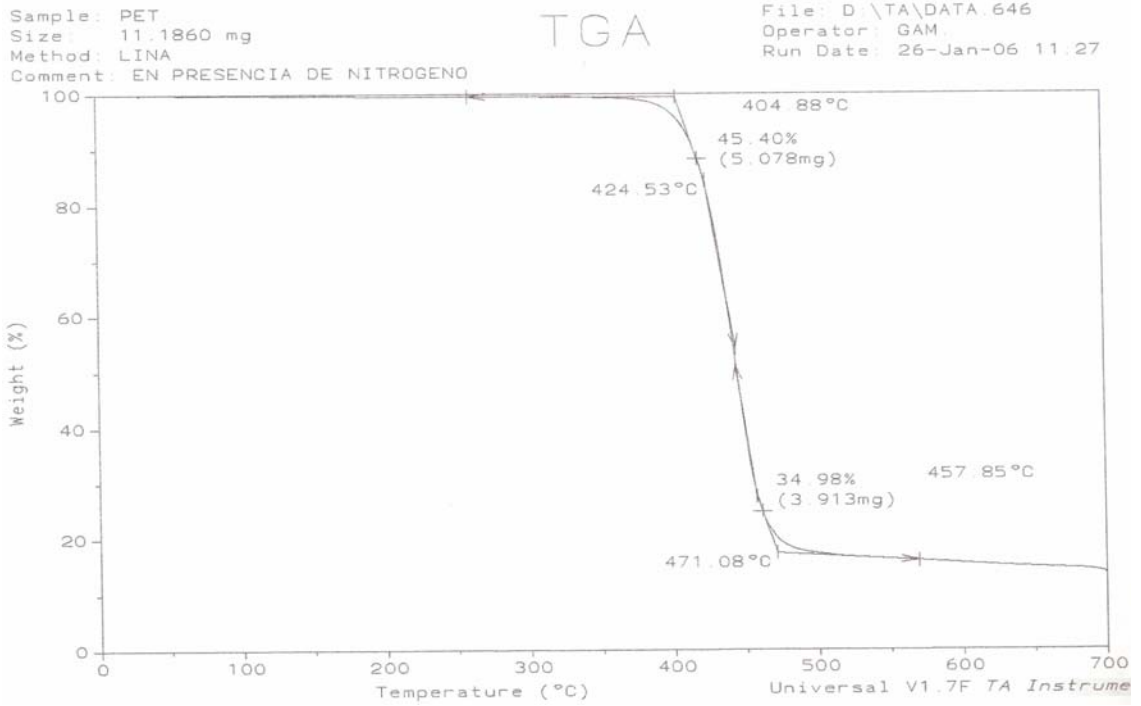
TERMOGRAMA TDI COMERCIAL



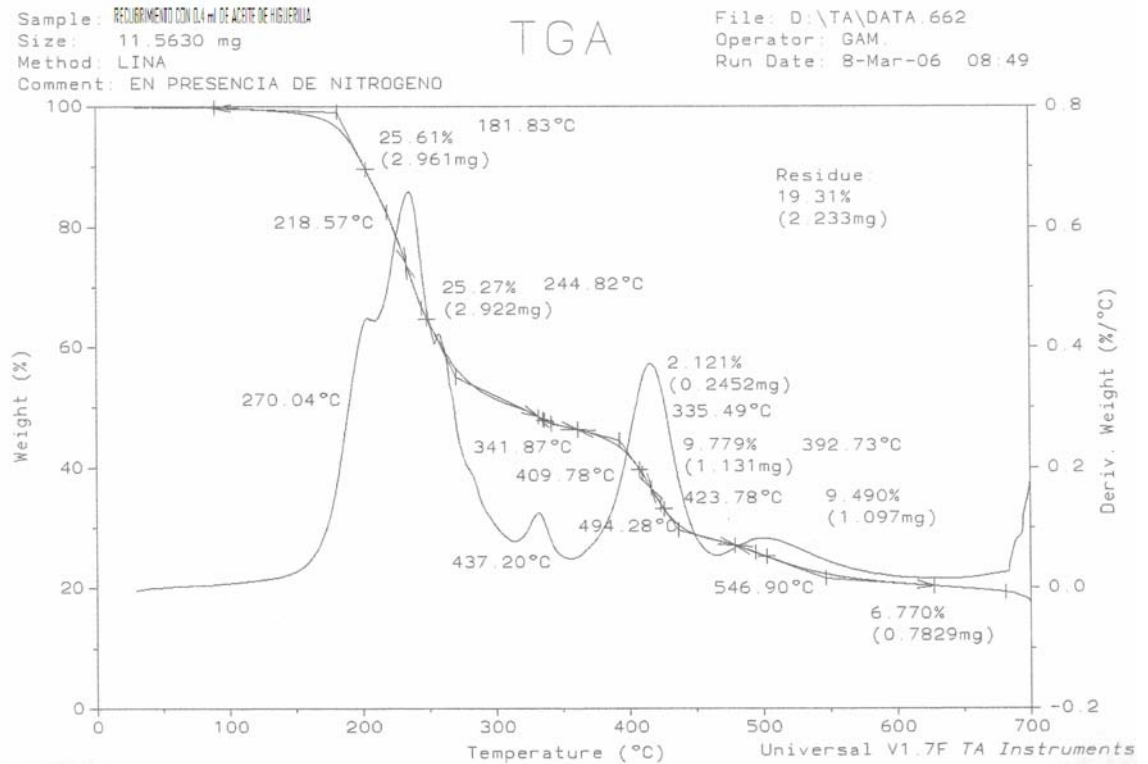
TERMOGRAMA FENOL RESIDUAL



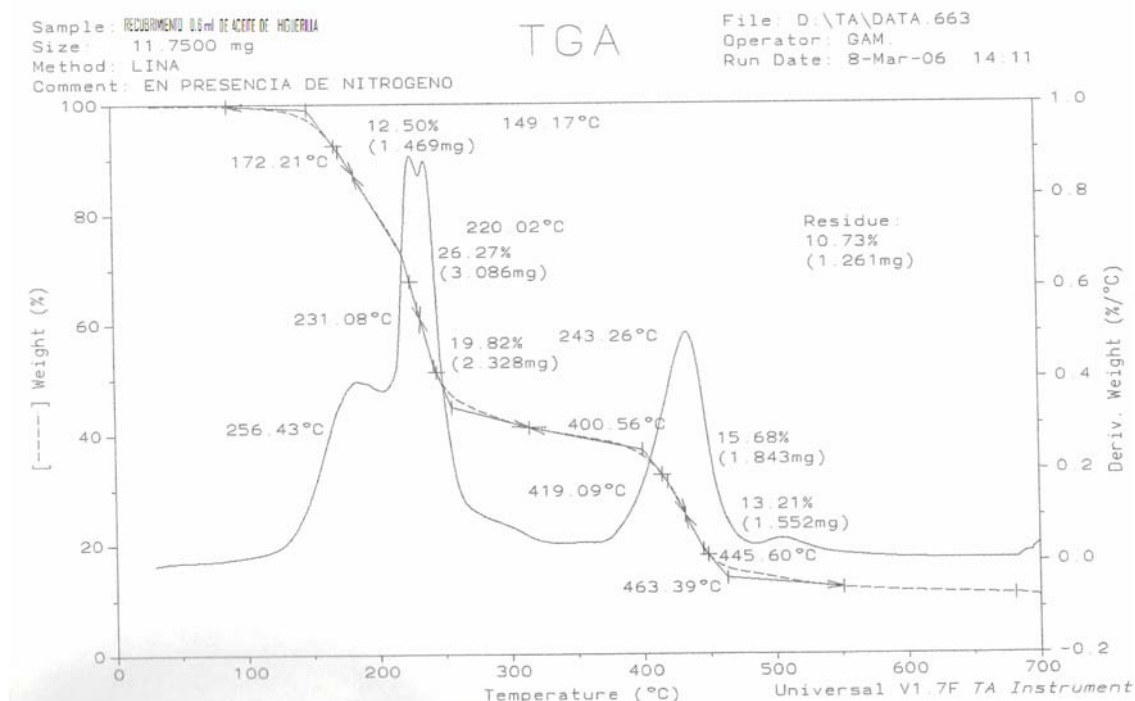
TERMOGRAMA PET POST-CONSUMO



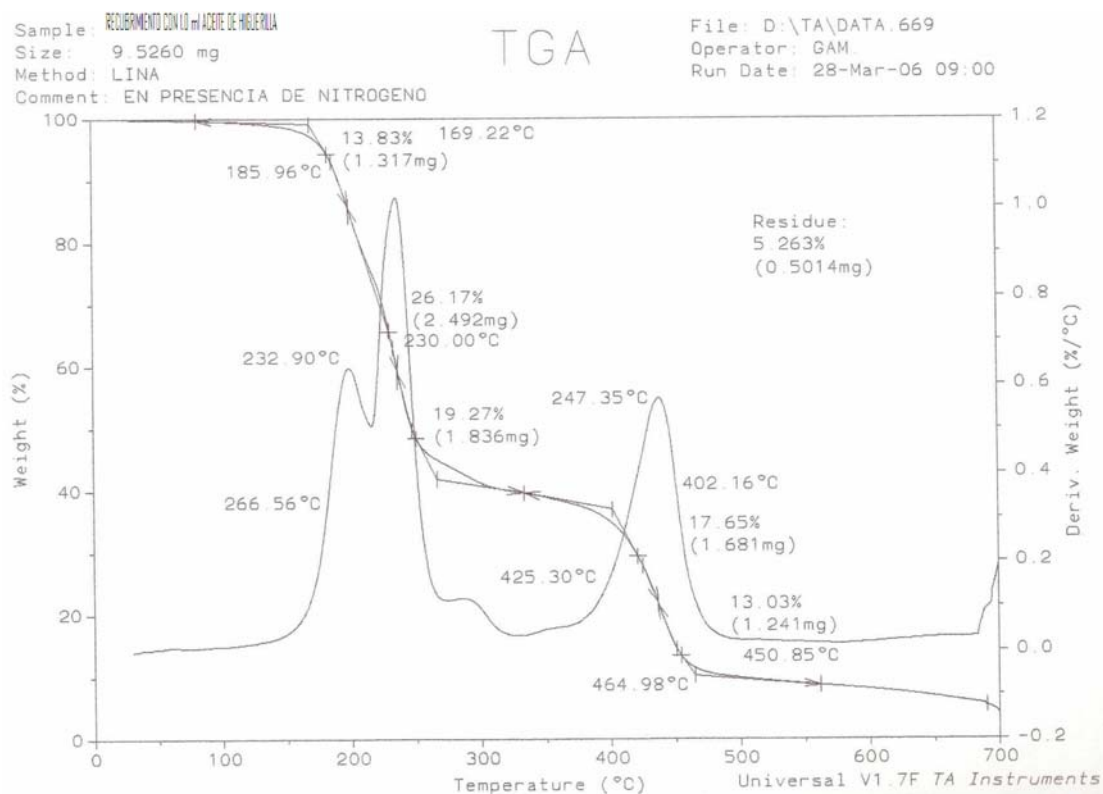
TERMOGRAMA: RECUBRIMIENTO CON 0.4 ml ACEITE DE HIGUERILLA



TERMOGRAMA: RECUBRIMIENTO CON 0.6 ml ACEITE DE HIGUERILLA

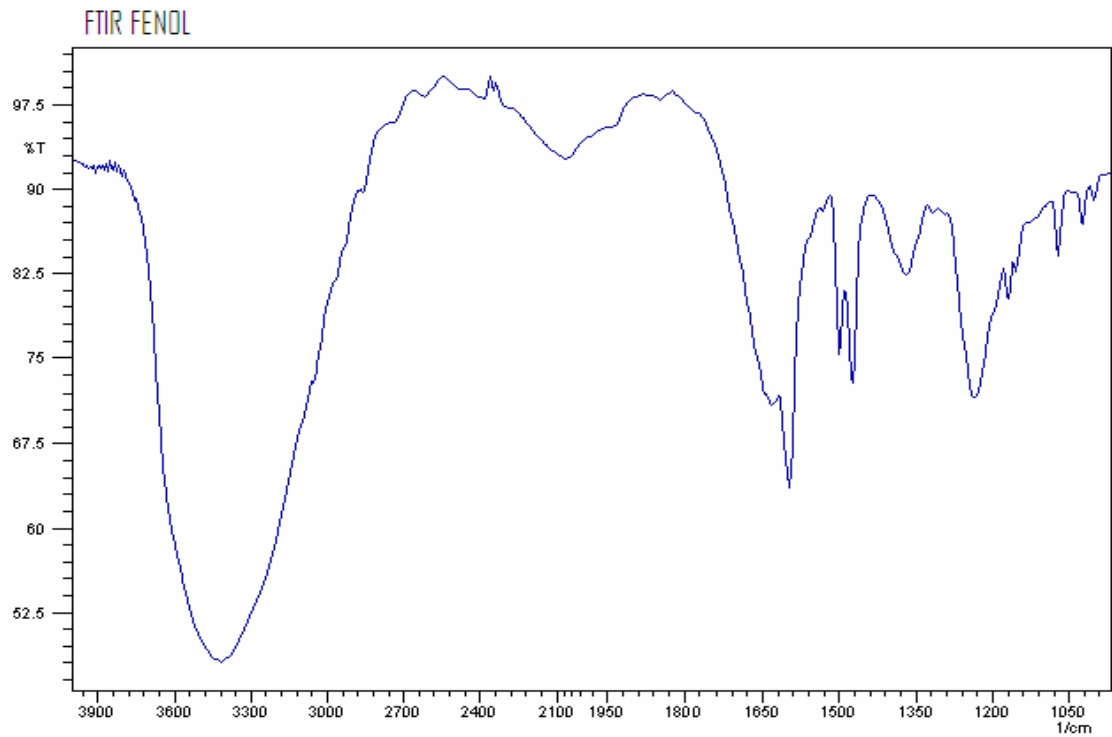


TERMOGRAMA: RECUBRIMIENTO CON 1.0 ml ACEITE DE HIGUERILLA

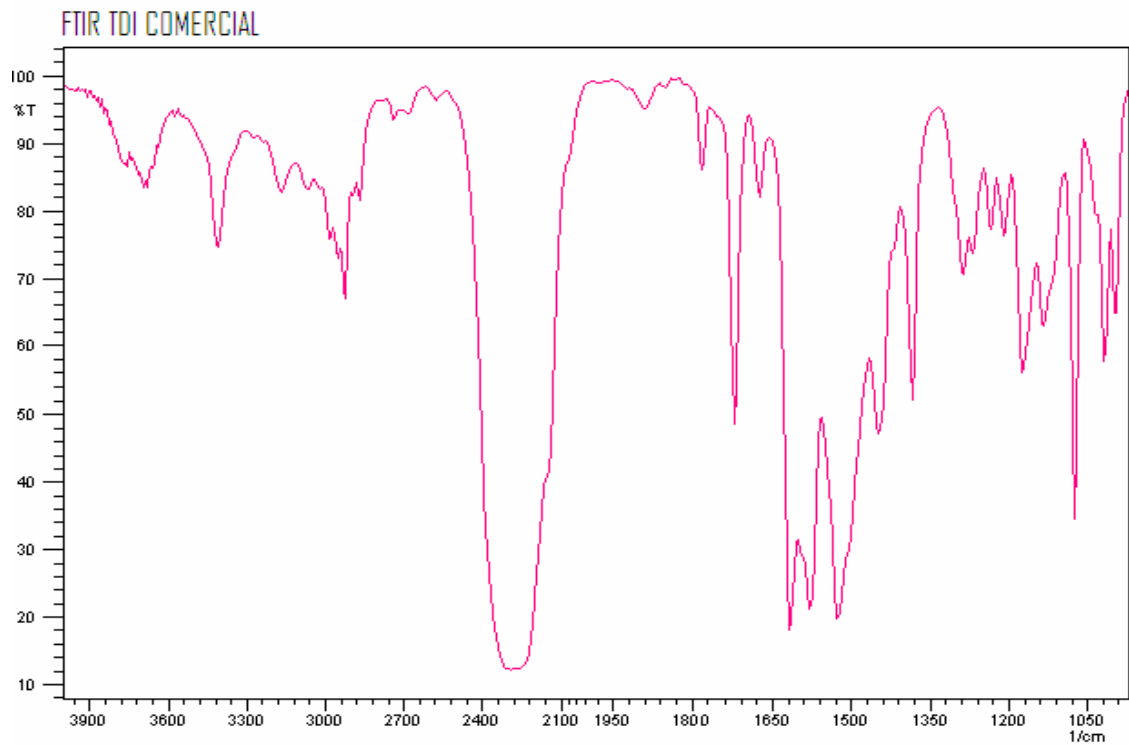


ANEXO E. ESPECTROS INFRARROJOS (FTIR)

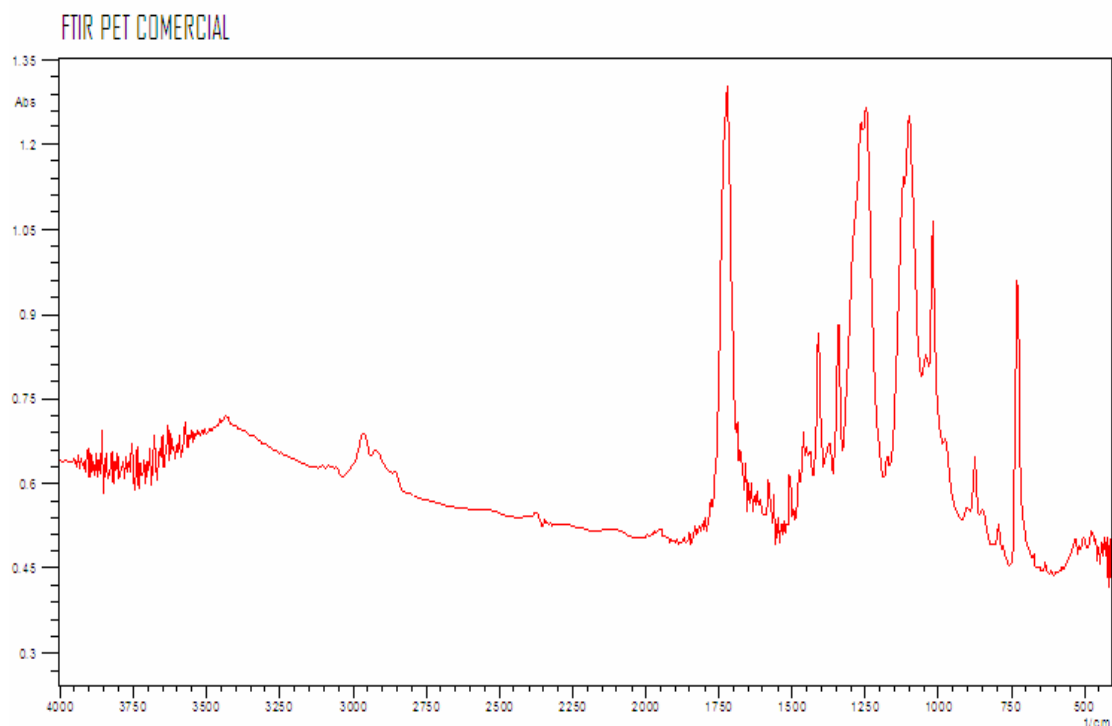
ESPECTRO FT-IR FENOL RESIDUAL



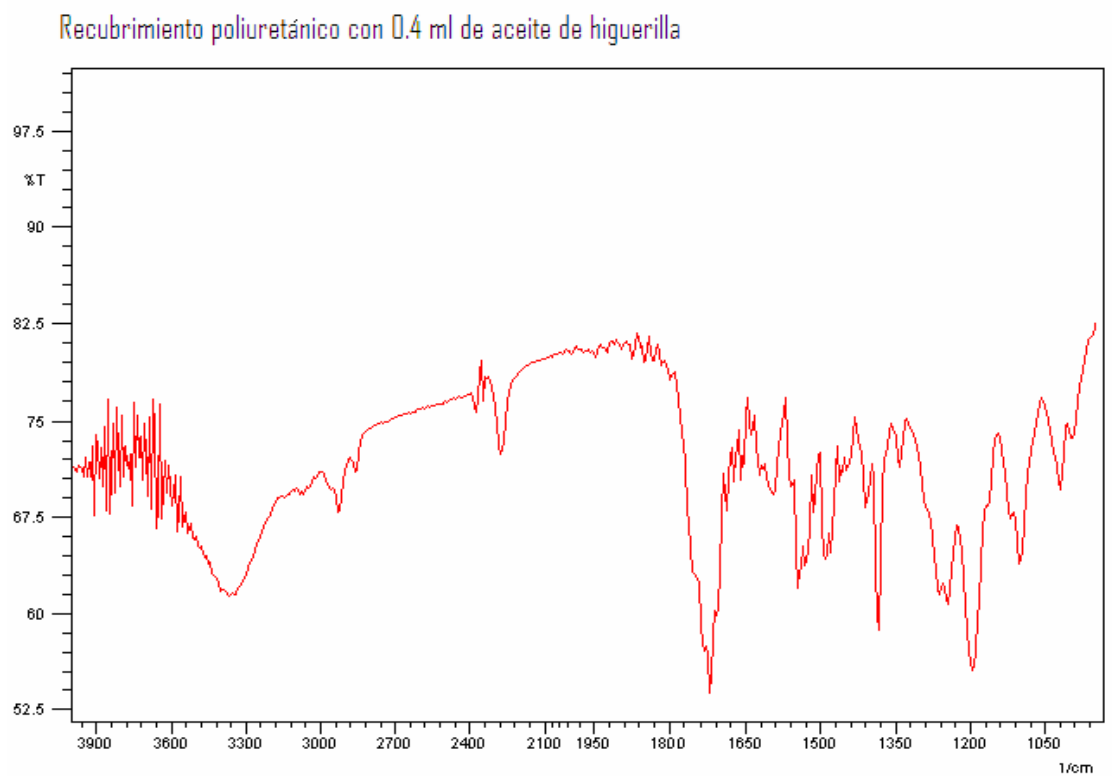
ESPECTRO FT-IR TDI COMERCIAL



ESPECTRO FT-IR PET POST-CONSUMO

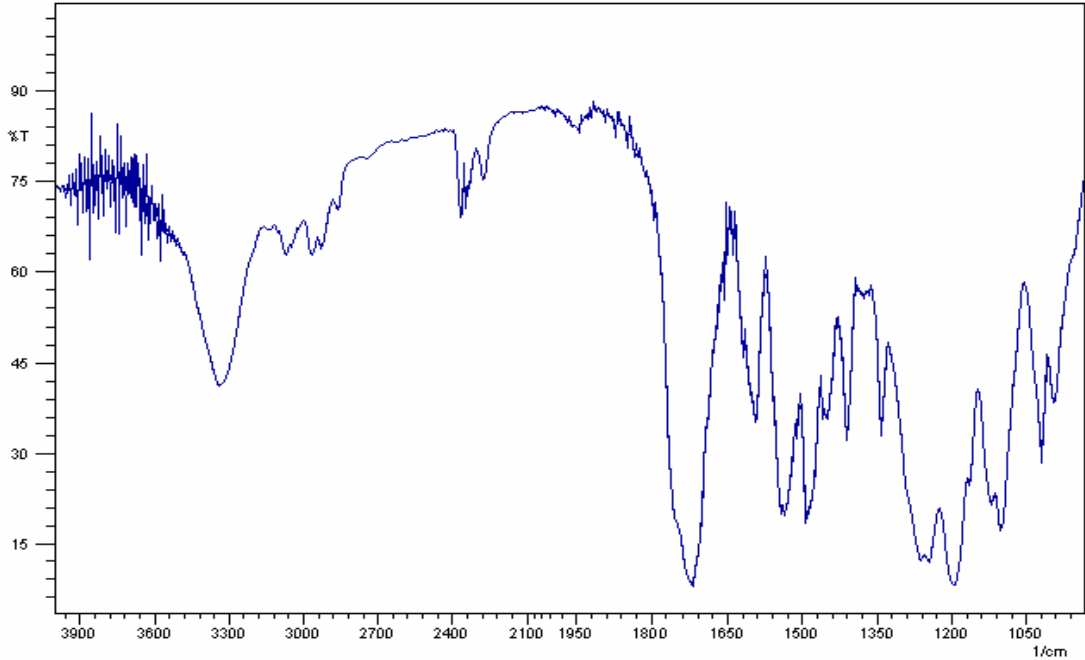


ESPECTRO FT-IR: RECUBRIMIENTO CON 0.4 ml ACEITE DE HIGUERILLA



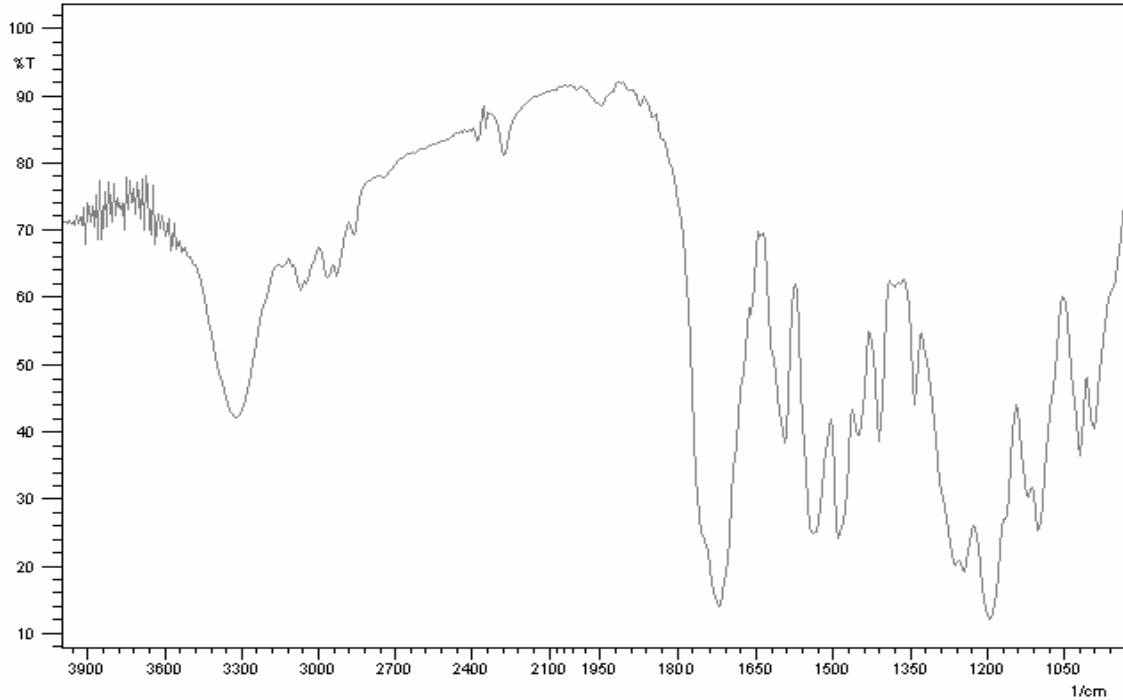
ESPECTRO FT-IR: RECUBRIMIENTO CON 0.6 ml ACEITE DE HIGUERILLA

Recubrimiento poliuretánico con 0.6 ml de aceite de higuerilla



ESPECTRO FT-IR: RECUBRIMIENTO CON 1.0 ml ACEITE DE HIGUERILLA

Recubrimiento con 1.0 ml de aceite de higuerilla



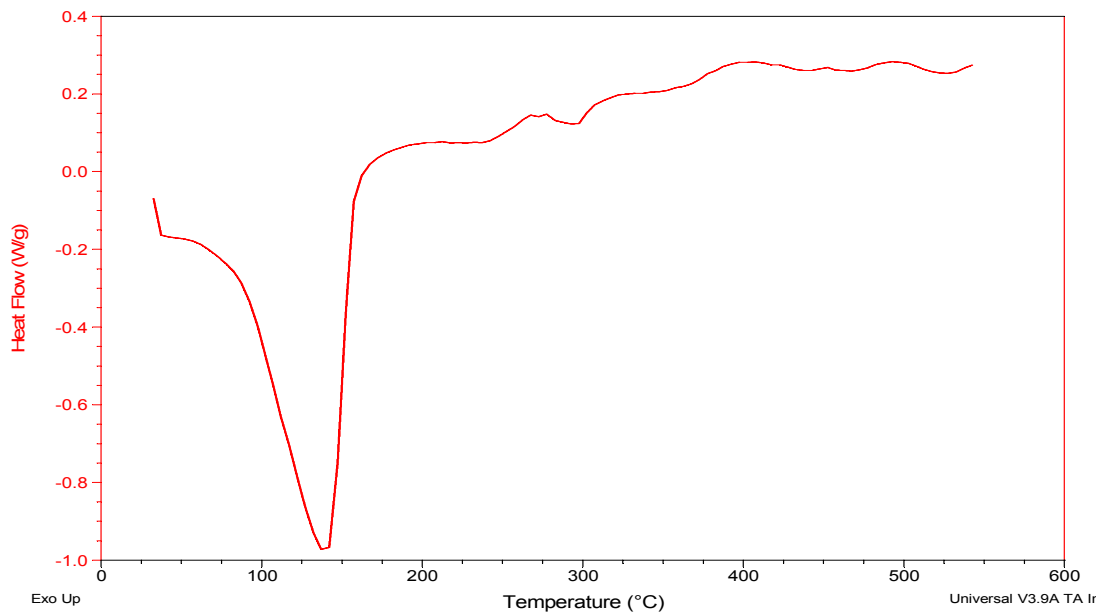
ANEXO F. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

TERMOGRAMA DSC: TDI COMERCIAL

Sample: TDI
Size: 5.3000 mg
Method: Metodo Vidrio

DSC

File: C:\TA\Data\DSC\Polimeros\TDI.001
Operator: G.A.M
Run Date: 23-Mar-05 16:34
Instrument: DSC Q10 V8.1 Build 261

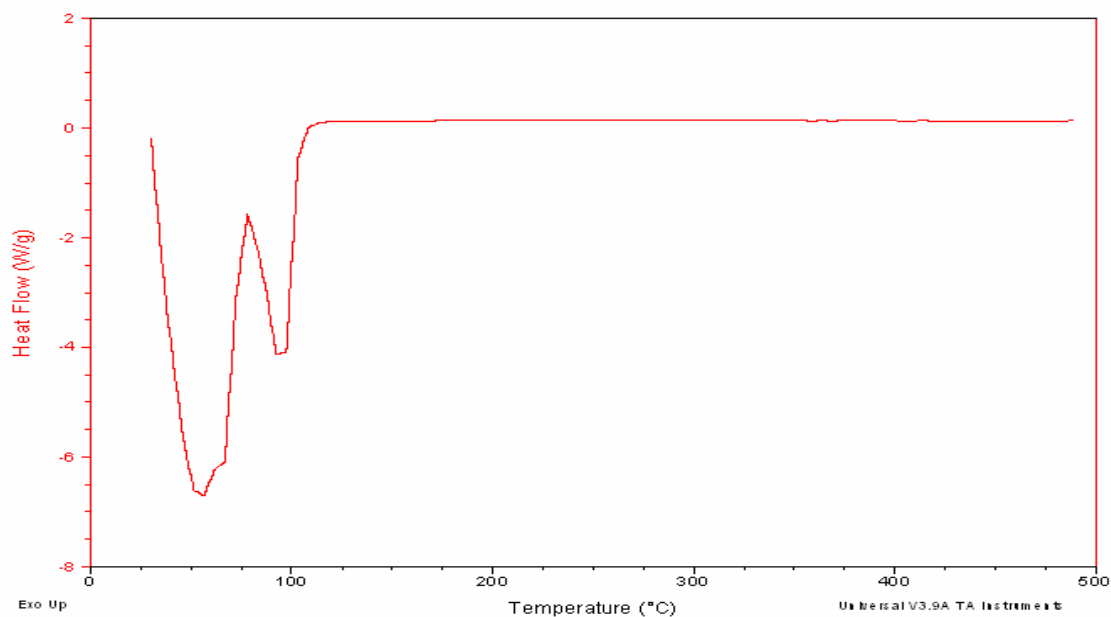


TERMOGRAMA DSC: FENOL RESIDUAL

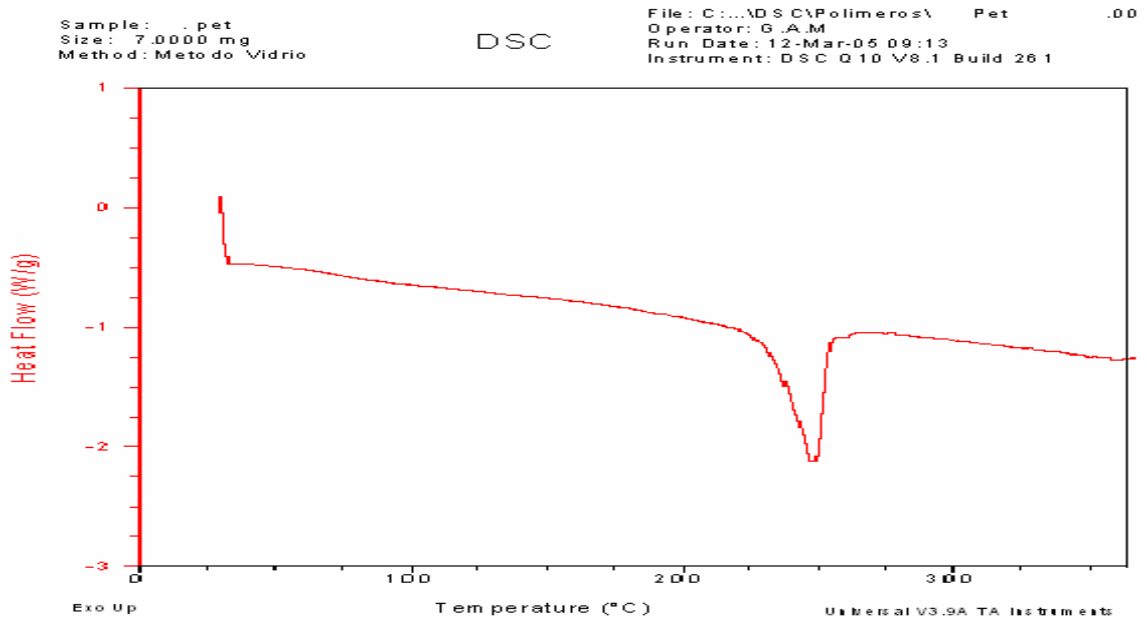
Sample: Fenol S
Size: 4.9000 mg
Method: Metodo Vidrio

DSC

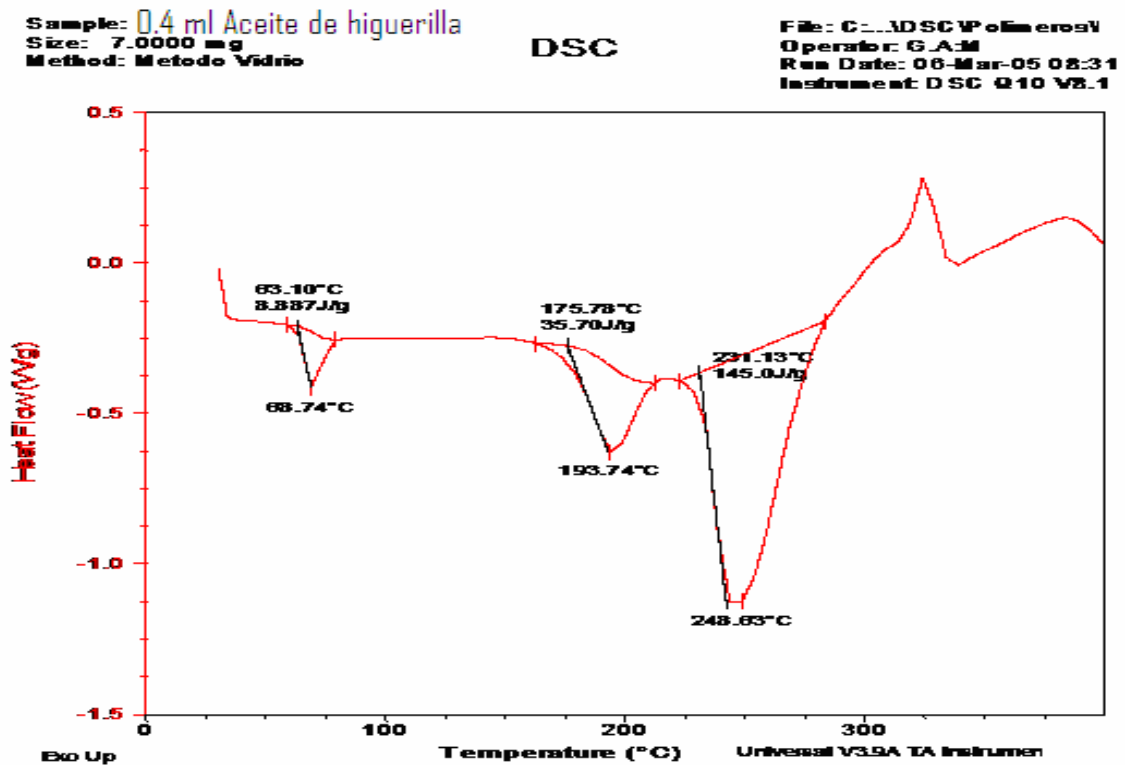
File: C:\TA\Data\DSC\Polimeros\Fenol S.0
Operator: G.A.M
Run Date: 26-Mar-05 16:16
Instrument: DSC Q10 V8.1 Build 261



TERMOGRAMA DSC: PET POST- CONSUMO



TERMOGRAMA DSC: RECUBRIMIENTO CON 0.4 ml DE ACEITE DE HIGUERILLA

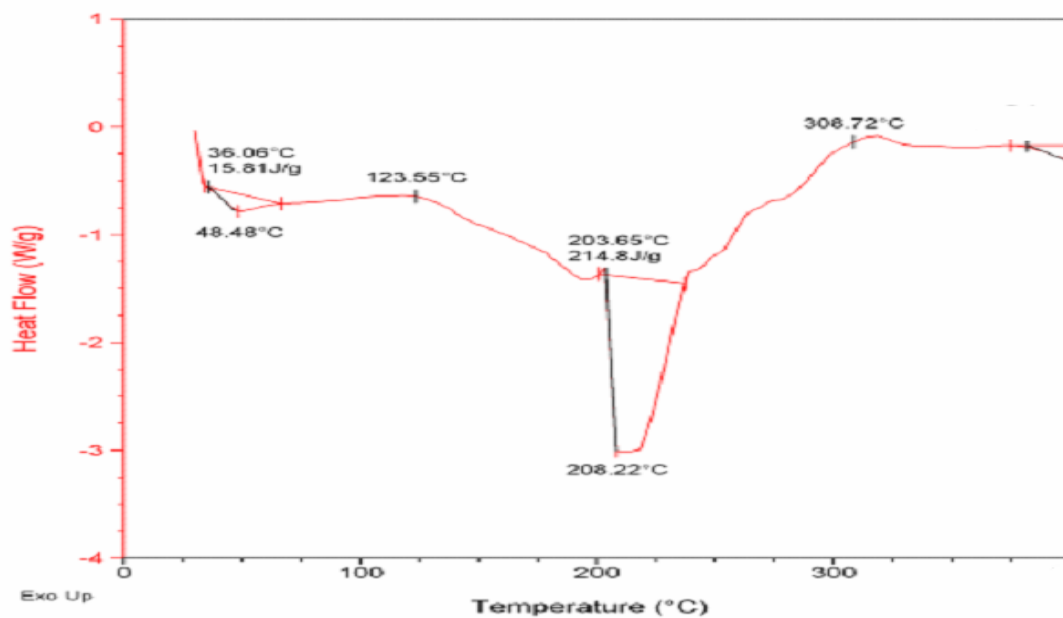


TERMOGRAMA DSC: RECUBRIMIENTO CON 0.6 ml DE ACEITE DE HIGUERILLA

Sample: 0.6 ml aceite de higuera
 Size: 6.5000 mg
 Method: Metodo Vidrio

File: C:\TA\Data\DSC\Polimeros\F
 Operator: G.A.M
 Run Date: 14-Mar-05 15:49
 Instrument: DSC Q10 V8.1 Build :

DSC

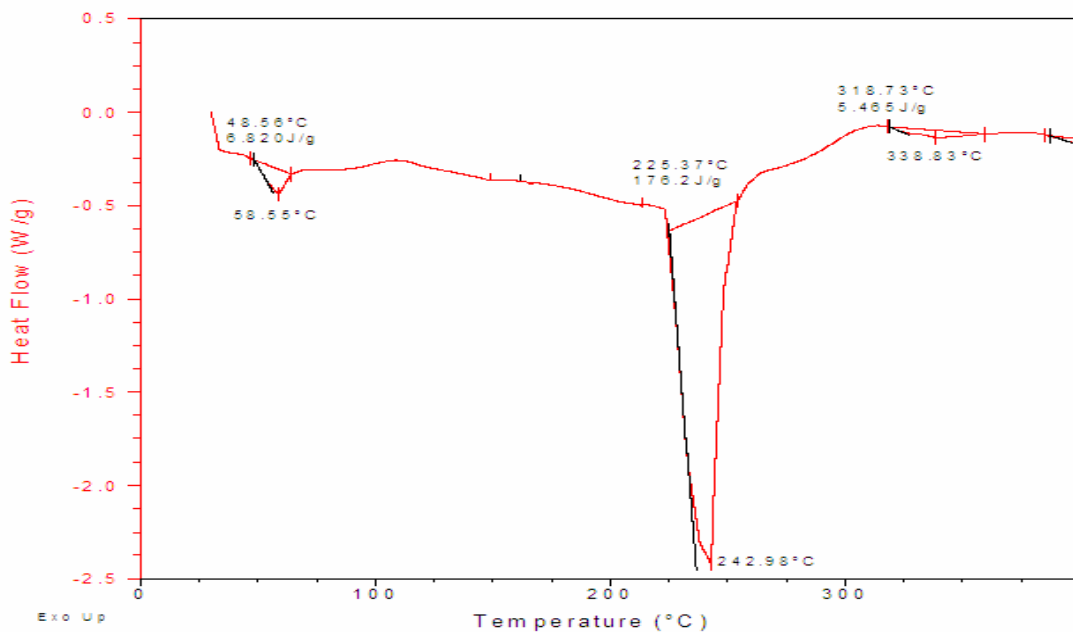


TERMOGRAMA DSC: RECUBRIMIENTO CON 1.0 ml DE ACEITE DE HIGUERILLA

Sample: 1.0 ml aceite de higuera
 Size: 6.2000 mg
 Method: Metodo Vidrio

File: C:\TA\Data\DSC\Polimeros\F
 Operator: G.A.M
 Run Date: 22-Mar-05 14:50
 Instrument: DSC Q10 V8.1 Build :

DSC



ANEXO G. REGISTRO FOTOGRÁFICO

PLACAS MDF RECUBIERTAS EN DIFERENTES COLORES

