

**FABRICACIÓN DE AGLOMERADOS DE CASCARILLA DE ARROZ Y  
POLIESTIRENO POST-CONSUMO**

**LAURA VIVIANA LÓPEZ MANRIQUE**

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

**2011**

**FABRICACIÓN DE AGLOMERADOS DE CASCARILLA DE ARROZ Y  
POLIESTIRENO POST-CONSUMO**

**LAURA VIVIANA LÓPEZ MANRIQUE**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Química**

**Director**

**JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ GALLEGO**

**Químico, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE QUÍMICA**

**BUCARAMANGA**

**2011**

## DEDICATORIA

*Dios este triunfo es tuyo.*

*A toda mi familia, especialmente*

*a mi Madre por su infinito apoyo, paciencia, oraciones y su gran amor,*

*a mi Padre por su apoyo y confianza,*

*a mi hermanito,*

*a mis nonitos Clementina y Pablo, mis otros padres.*

*A mi amiga Isabel†*

*A todos mis grandes amig@s y a todas las personas que siempre estuvieron  
caminando conmigo, dándome la mano y levantándome para lograr esto.*

*Laurita.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios todo poderoso por darme la vida y a la Santísima Virgen María por su intersección.

Al profesor José Carlos por su enorme colaboración, paciencia, amistad, sus sabias enseñanzas, consejos y por haber permitido que hiciera parte de su laboratorio.

A mis amig@s: Ligia María, Luis Ernesto, Vanessa Catalina, Diego Leonardo, César Julián, Wilmar Antonio, Eva Gisell, José Luis, Juliana R., Laura Jacqueline, Claudia Juliana, Ruby, Silvia Juliana, Mónica y Doña Mary.

## RESUMEN

**TITULO:** FABRICACIÓN DE AGLOMERADOS DE CASCARILLA DE ARROZ Y POLIESTIRENO POST-CONSUMO\*

**AUTOR:** LAURA VIVIANA LÓPEZ MANRIQUE\*\*

**Palabras claves:** Aglomerados, madera plástica, resina poliéster, poliestireno post-consumo.

### DESCRIPCION:

El aprovechamiento de los materiales plásticos post-consumo, la utilización de subproductos de la agroindustria y la generación de materiales amigables con el medio ambiente, se han convertido en una de las mayores prioridades de estudio por parte de la industria de la madera plástica; con el objeto de sustituir otros materiales provenientes de los recursos naturales como la madera y a la vez contribuir a la mitigación del impacto ambiental negativo que tiene la acumulación de desechos plásticos y la tala imperante de árboles; generándose productos con características y aplicaciones similares a las especies madereras que normalmente se usan.

En el presente trabajo se elaboraron aglomerados de cascarilla de arroz, usando como material aglomerante resina poliéster (aglomerado común) y resina poliéster con poliestireno post-consumo (aglomerado formulado). Lográndose la fabricación de materiales sólidos, con apariencia física exterior muy similar entre sí, livianos, resistentes a la humedad, perfectamente maquinables, con resistencia parcial a algunos agentes químicos y buen comportamiento térmico que permite considerarlos como útiles en aplicaciones diversas. De esta manera, se aplicó una vía de reciclaje del Poliestireno post-consumo reincorporándolo al ciclo de vida útil, se consiguió darle una aplicación a un subproducto de la industria del arroz con la posibilidad de incrementar su valor monetario, produciendo materiales amigables con el medio ambiente que pueden ser menos costosos para la industria de la madera plástica puesto que se han incluido materiales de desecho en su fabricación.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: José Carlos Gutiérrez Gallego.

## ABSTRACT

**TITLE:** PRODUCTION OF AGGLOMERATES OF HUSK OF RICE AND POLIESTYRENE POST-CONSUMPTION\*

**AUTHOR:** LAURA VIVIANA LÓPEZ MANRIQUE\*\*

**KEY WORDS:** Agglomerates, plastic wood, resin polyester, polystyrene post-consumption.

### DESCRIPTION:

The use of the materials plastic post-consumption, the use of by-products of the agroindustry and the generation of friendly materials with the environment, they have transformed into one of the biggest study priorities on the part of the industry of the plastic wood; in order to substituting other materials coming from the natural resources as the wood and at the same time to contribute to the mitigation of the environmental negative impact that has the accumulation of plastic wastes and the prevailing pruning of trees; being generated products with characteristic and similar applications to the timber species that are usually used.

Presently work agglomerates of husk of rice were elaborated, using as material amassing resin polyester (common agglomerate) and resin polyester with poliestireno post-consumption (formulated agglomerate). Being achieved the production of solid materials, with external very similar physical appearance to each other, light, resistant to the humidity, perfectly manageable, with partial resistance to some agents thermal chemical and good behavior that it allows to consider them as useful in diverse applications. This way, a road of recycling of Poliestireno post-consumption was applied reinstating it to the lifespan cycle, it was possible to give an application to a by-product of the industry of the rice with the possibility of increasing its monetary value, producing friendly materials with the environment that you/they can be less expensive for the industry of the plastic wood since waste materials have been included in its production.

---

\* Degree Project

\*\* Faculty of Sciences. School of Chemistry. Directress: José Carlos Gutiérrez Gallego.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	17
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
1.1 POLIESTIRENO	19
1.1.1 Poliestireno expandible (EPS)	20
1.2 CASCARILLA DE ARROZ	22
1.3 RESINA POLIÉSTER	24
1.4 RECICLAJE DE POLÍMEROS	25
1.4.1 Métodos de reciclaje de plásticos	25
1.5 AGLOMERADO O MADERA PLÁSTICA	27
1.5.1 Caracterización de los aglomerados	28
<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>32</b>
2.1 PREPARACION DE LA MATERIA PRIMA	33
2.1.1 Disolución EPS post-consumo en estireno	33
2.1.2 Preparación de la resina poliéster pre acelerada (RPP)	33
2.2 ELABORACIÓN DE LOS AGLOMERADOS	34
2.2.1 Aglomerado común	34
2.2.2 Aglomerado formulado	34

2.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS	35
2.3.1	Test de la llama	35
2.3.2	Comportamiento térmico	35
2.3.3	Pruebas de degradación química	36
2.3.4	Determinación de la densidad	36
2.3.5	Determinación de la propiedades mecánicas	36
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>38</b>
3.1	TRANSFORMACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	38
3.1.1	Disolución EPS post-consumo en estireno (EPS-Es)	38
3.2	FABRICACIÓN DE AGLOMERADOS	39
3.2.1	Aglomerado común	43
3.2.2	Aglomerado formulado	44
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS	46
3.3.1	Test de la llama	47
3.3.2	Comportamiento térmico	47
3.3.3	Densidad	50
3.3.4	Degradación química	51
3.3.5	Propiedades mecánicas	57
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>64</b>

<b>5. RECOMENDACIONES</b>	<b>66</b>
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	71

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Estructura molecular del PS	19
Figura 2. Estructura molecular del estireno monómero	19
Figura 3. Clasificación del poliestireno	20
Figura 4. Apariencia física del EPS	21
Figura 5. Reacción general de polimerización de una resina poliéster	25
Figura 6. Estructura de una resina poliéster orto ftálica	26
Figura 7. Diagrama ilustrativo de las opciones de recuperación, los procesos y el resultado sobre la recuperación de los residuos plásticos	26
Figura 8. Test de la llama	28
Figura 9. Medición de la densidad de un objeto utilizando el principio de Arquímedes	29
Figura 10. Esquema general del desarrollo experimental	32
Figura 11. Cascarilla de arroz molida	38
Figura 12. Izq. EPS post-consumo disuelto en estireno, der. Resina Poliéster pre acelerada.	39
Figura 13. Aglomerados fabricados inicialmente	40
Figura 14. Reacción proceso de polimerización	41
Figura 15. Ilustración de la formación de la red tridimensional producto de la polimerización de la resina. a) Especies químicas participantes de la reacción. b) Estructura entrecruzada producto de la reacción de adición	42
Figura 16. Muestra de los aglomerados 1C y 2C	43

Figura 17. Matriz polimérica RPP/EPS-Es	44
Figura 18. Matriz polimérica (RPP/EPS-Es) polimerizada	45
Figura 19. Algunos de los aglomerados C y F	46
Figura 20. Prueba de ignición	47
Figura 21. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en agua	53
Figura 22. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en aceite mineral	53
Figura 23. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en HNO <sub>3</sub>	54
Figura 24. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54
Figura 25. Representación de la hidrólisis ácida de la celulosa	55
Figura 26. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en NaOH	56
Figura 27. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en reactivos químicos	56
Figura 28. Ensayo de compresión. Arriba muestra C, abajo muestra F	58
Figura 29. Comparación de resultados de compresión en términos de la fuerza	59
Figura 30. Comparación de resultados de compresión en términos del esfuerzo de compresión	59
Figura 31. Energía de Impacto	60
Figura 32. Probetas después del ensayo de impacto. Arriba muestra C, abajo muestra F	61
Figura 33. Muestras C y F durante el ensayo de flexión. Arriba muestra C, abajo muestra F	61
Figura 34. Comparación de resistencia a la flexión de varias muestras	62

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Cuadro resumido de las propiedades químicas del EPS usual en el mercado	21
Tabla 2. Comparación de la conductividad térmica de la cascarilla de arroz y algunos aislantes comerciales	22
Tabla 3. Características de la cascarilla de arroz	23
Tabla 4. Ensayos con las diferentes proporciones de los aglomerados	34
Tabla 5. Ensayos con las diferentes proporciones de los aglomerados formulados	35
Tabla 6. Comportamiento térmico de los aglomerados C y F	48
Tabla 7. Pruebas de densidad aglomerado C	50
Tabla 8. Pruebas de densidad aglomerado F	50
Tabla 9. Resistencia química de los aglomerados	51
Tabla 10. Resistencia química de las matrices poliméricas	52
Tabla 11. Dureza de los aglomerados C y F	57
Tabla 12. Resultados de ensayo de compresión para los aglomerados C y F	58
Tabla 13. Resultados de resistencia a la flexión	61

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
ANEXO 1. NORMAS TÉCNICAS	71
ANEXO 2. ENSAYO DE COMPRESIÓN	78
ANEXO 3. ENSAYO DE FLEXIÓN	80
ANEXO 4. FICHA DE SEGURIDAD DEL ESTIRENO	82

## ABREVIATURAS

**ABS** Acrilonitrilo Butil Estireno

**ASTM** Association Society for Testing and Materials

**C** Común

**EPS** Poliestireno expandible

**EPS-Es** Poliestireno Expandible post-consumo en Estireno

**F** Formulado

**MEK-P** Peróxido de Metil Etil Cetona

**PS** Poliestireno

**RP** Resina Poliéster

**RPP** Resina Poliéster Virgen Pre acelerada

## INTRODUCCIÓN

Aprovechar la abundancia y las propiedades fisicoquímicas de algunos materiales de bajo costo y fácil accesibilidad, con la intención de generar productos que puedan sustituir (en cuanto a su gama de aplicaciones) a los que provienen de los recursos naturales, como en el caso de la madera, se constituye como una alternativa de contribución a la remediación del impacto ambiental que puede tener la aplicación de otros métodos de eliminación de tales materiales, como su incineración, despojo en vertederos o el hecho de permitir su acumulación en el medio.

Estos productos sintéticos son desarrollados incluyendo el criterio de la disminución o eliminación de recursos naturales en su fabricación, haciendo uso del reciclaje de materiales poliméricos post-consumo e incorporando residuos vegetales a los que usualmente se les da poca aplicación. Una vía de preparación de estos nuevos productos, consiste en hacer uso de los procesos de polimerización de algunas resinas termoestables y aprovechar sus múltiples posibilidades de combinación con materiales de refuerzo que permitan elevar sus propiedades mecánicas (Genauck, p.189).

Conociendo las múltiples aplicaciones de la resina poliéster y aprovechando la gran cantidad de material polimérico post-consumo generado en la sociedad (normalmente se le distribuye en los destinos de las basuras municipales olvidándose de la posibilidad de reciclarlo); junto con la implementación de la cascarilla vegetal como carga reforzante de una matriz polimérica, buscando lograr incrementar su aplicabilidad, (la cascarilla de arroz es un abundante subproducto de la agroindustria que muchas veces termina por permanecer en las bodegas de las arroceras) se constituye en una posible ruta para fabricar nuevos materiales y quizá en una buena herramienta para disminuir el impacto ambiental negativo que tiene la acumulación, el vertimiento a las fuentes de agua o la

incineración de polímeros como el EPS post-consumo y las fibras vegetales como la cascarilla de arroz.

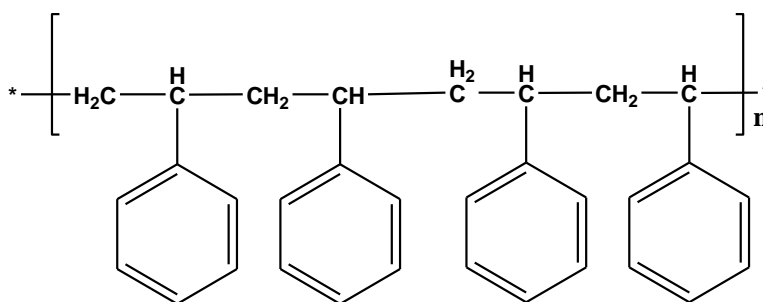
Por lo tanto, la implementación de EPS post-consumo y la cascarilla de arroz para la elaboración de productos como la madera plástica es un importante y promisorio tema de investigación para la industria encargada del desarrollo de materiales aglomerados.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 POLIESTIRENO

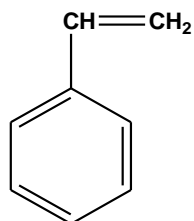
El poliestireno (PS) es un polímero vinílico termoplástico rígido, transparente, incoloro, resistente y duro a temperaturas normales de uso; sin embargo, reblandece aproximadamente a los 100°C. Estructuralmente, es una cadena larga hidrocarbonada, unida con un grupo fenilo (figura 1).

Figura 1. Estructura molecular del PS



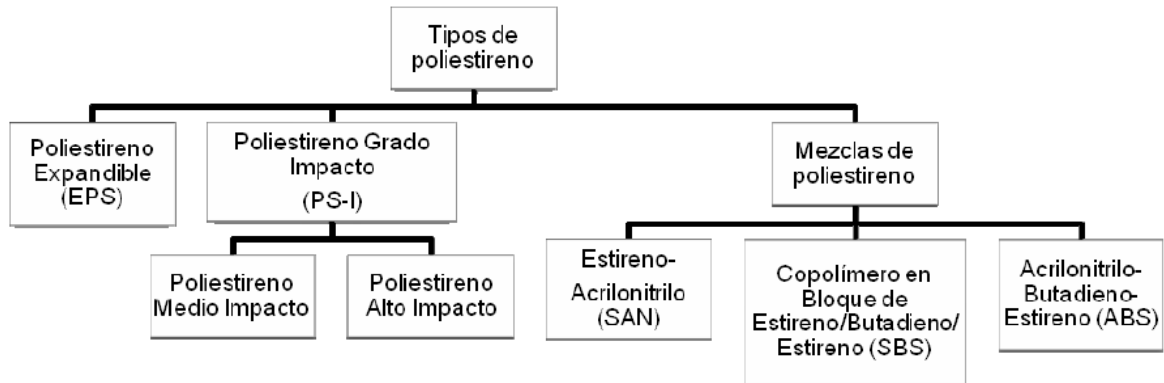
El PS es producido a partir de la polimerización de estireno monómero (figura 2). La polimerización ocurre a través del enlace RCH=CH<sub>2</sub> formando moléculas no cristalinas, con cientos o miles de unidades estructurales. La polimerización del estireno produce un termoplástico transparente, incoloro, duro y rígido llamado poliestireno para uso general (PS).

Figura 2. Estructura molecular del estireno monómero



Se distinguen varios tipos de PS (figura 3) con propiedades diferentes que permiten a su vez la producción de una diversidad de artículos para usos varios. Uno de los más utilizados es el poliestireno expandible o espumado.

Figura 3. Clasificación del poliestireno



**1.1.1 Poliestireno Expandible (EPS).** Material plástico celular y rígido fabricado a partir del moldeo de perlas pre expandidas de poliestireno. Es un material dúctil y resistente a temperaturas bajo cero, pero a temperaturas elevadas, aproximadamente 88 °C, pierde sus propiedades. Debido a ello, y a su bajo coeficiente de conductividad térmica se utiliza como aislante a bajas temperaturas. El color natural del EPS es blanco (figura 4). Aproximadamente un 98% del volumen del material es aire y únicamente un 2% es materia sólida (PS). Posee poder de amortiguamiento, es decir, permite absorber la energía producida por golpes y vibraciones, flota en el agua y es completamente inerte a los metales. Resiste a la mayoría de los ácidos, soluciones alcalinas y saladas, sin importar su concentración; sin embargo, no es resistente a solventes orgánicos o aceites minerales. También resiste a la temperatura e intemperie y no es tóxico (Pachón, 2008).

Figura 4. Apariencia física del EPS



- **Resistencia Química del EPS** El EPS sufre de forma muy notoria el ataque de disolventes tradicionales como la acetona. Sin embargo, el EPS muestra una notoria resistencia a ser atacado por cualquier medio acuoso básico o ácido (González, 2005).

Tabla 1. Cuadro resumido de las propiedades químicas del EPS usual en el mercado

Sustancia Activa	Estabilidad
<b>Solución Salina</b>	Estable: el EPS no se destruye con acción prolongada
<b>Jabones y soluciones de tensioactivos</b>	Estable: el EPS no se destruye con acción prolongada
<b>Lejías</b>	Estable: el EPS no se destruye con acción prolongada
<b>Ácidos diluidos</b>	Estable: el EPS no se destruye con acción prolongada
<b>Ácido Clorhídrico 35%, Acido Nítrico 50%</b>	Estable: el EPS no se destruye con acción prolongada
<b>Ácidos Concentrados (sin agua) al 100%</b>	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
<b>Soluciones Alcalinas</b>	Estable: el EPS no se destruye con acción prolongada
<b>Disolventes Orgánicos (Acetona, ésteres, ...)</b>	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
<b>Hidrocarburos Alifáticos Saturados</b>	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
<b>Aceites de Parafina, Vaselina</b>	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie.
<b>Aceite de Diesel</b>	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
<b>Carburantes</b>	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
<b>Alcoholes (metanol, etanol)</b>	Estable: El EPS no se destruye con una acción prolongada
<b>Aceites de Silicona</b>	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie.

- **Propiedades biológicas del EPS** El EPS es un material que no se pudre, no enmohece y no se descompone. Tampoco tiene valor nutritivo alguno que fomente el desarrollo de microorganismos. Sin embargo en muchas de sus aplicaciones la estructura resulta impregnada de residuos por lo cual puede convertirse en portador de microorganismos aunque no participe del proceso biológico (González, 2005).

## 1.2 CASCARILLA DE ARROZ

Es una fibra corta que recubre naturalmente el grano de arroz para protegerlo del ambiente. Su longitud varía entre 5 y 11 mm según la especie considerada, es de estructura ondulada y apariencia superficial irregular. Tiene propiedades altamente abrasivas, 6 en la escala Mohs en estado natural. Su estructura presenta un volumen poroso del 54%, cavidades que permanecerán cerradas en tanto no se someta a un proceso de combustión, su coeficiente de conductividad térmica permite presumir su utilidad como componente principal de sistemas de aislamiento térmico, tal y como se puede apreciar en la tabla 2:

Tabla 2. Comparación de la conductividad térmica de la cascarilla de arroz y algunos aislantes comerciales

Material	K (W/m*k)
Lana mineral	0.0303
Poliestireno expandido	0.0330
<i>Cascarilla de arroz</i>	0.0360
Fibra de vidrio	0.0380
Corcho aglomerado	0.0450

Esta fibra presenta un comportamiento ignífugo, por lo tanto no inicia fácilmente la combustión y no produce llama mientras se quema. Es probable que este aspecto, así como su alta estabilidad bioquímica, se deba a que es la fibra vegetal con mayor contenido de minerales, así como también a su concentración de silicio; sin

embargo, este hecho la hace imposible de ingerir como alimento. Presenta un valor nulo por ser desecho, no se le ha dado un uso adecuado para conferirle un valor agregado y por eso existe la factibilidad de poder utilizarla como carga o relleno en una matriz polimérica, la cual es el medio donde se inunda la cascarilla de arroz (González, 2010). En la tabla 3, se presentan algunas de las características de la cascarilla de arroz.

La transformación de las propiedades físico-químicas de la cáscara comienza por encima de los 750°C, lo cual le garantiza un amplio rango de estabilidad térmica (Cadena, 2002).

Tabla 3. Características de la cascarilla de arroz (Cadena, 2002)

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Densidad a granel</b>	0,12-0,13 g/mL
<b>Capacidad de Intercambio Iónico</b>	2-3%
<b>Retención de Humedad</b>	0,10-0,12 L/L
<b>Nitrógeno</b>	0,50-0,60%
<b>Fósforo</b>	0,08-0,10%
<b>Potasio</b>	0,20-0,40%
<b>Calcio</b>	0,10-0,15%
<b>Magnesio</b>	0,10-0,12%
<b>Fibra (celulosa)</b>	39,05%
<b>Proteínas</b>	3,56%
<b>Azufre</b>	0,12-1,14%
<b>Hierro</b>	200-400 ppm
<b>Manganeso</b>	200-800 ppm
<b>Cobre</b>	3-5 ppm
<b>Zinc</b>	15-30 ppm
<b>Boro</b>	4-10 ppm
<b>Cenizas</b>	12-13%
<b>Sílice (SiO<sub>2</sub>)</b>	10-12%
<b>Lignina</b>	22,80%

### 1.3 RESINA POLIÉSTER

Es una resina termoestable a temperatura ambiente que puede pasar de su estado inicial a sólido, mediante la adición de un iniciador y un catalizador, generando una reacción de polimerización, esto se lleva a cabo a temperatura ambiente; su proceso de endurecimiento es conocido como curado. Una vez la resina llega a su estado sólido, no es posible que vuelva a su estado inicial. Algunas características que presenta son: la posibilidad de curado a temperatura ambiente, posibilidad de moldeo de piezas grandes y pequeñas, buena estabilidad dimensional, excelente resistencia a ambientes químicamente agresivos, buenas propiedades mecánicas y eléctricas, resistencia a la temperatura (hasta 110 °C) y baja absorción de agua (Álvarez, 2009).

La reacción de curado o entrecruzamiento de resinas poliéster insaturado es muy compleja ya que intervienen muchos procesos reactivos simultáneamente (Ramis, 1993). El proceso sigue un mecanismo de tipo radicalario. Los radicales libres para el inicio del proceso son suministrados, normalmente, por un iniciador, habitualmente es un peróxido, que se puede descomponer, por rotura homolítica del enlace O-O, mediante la acción del calor o de un catalizador.

Los catalizadores se utilizan habitualmente para provocar la descomposición química del iniciador a bajas temperaturas. Los más utilizados son las sales orgánicas de cobalto y las aminas terciarias<sup>1</sup>.

En la figura 5, se muestra la reacción general de polimerización de una resina poliéster y en la figura 6 se puede observar su estructura molecular.

---

<sup>1</sup> RAMIS, Xavier. Caracterización de los Termoestables. En: Estudio de la eficiencia de sistemas químicos de iniciación del curado de resinas de poliéster insaturado. Trabajo de grado de Doctor en Ciencias Químicas. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, 1993. p. 25.

Figura 5. Reacción general de polimerización de una resina poliéster

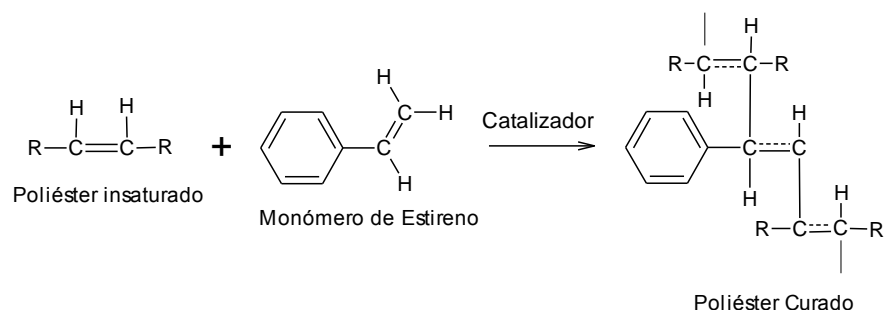
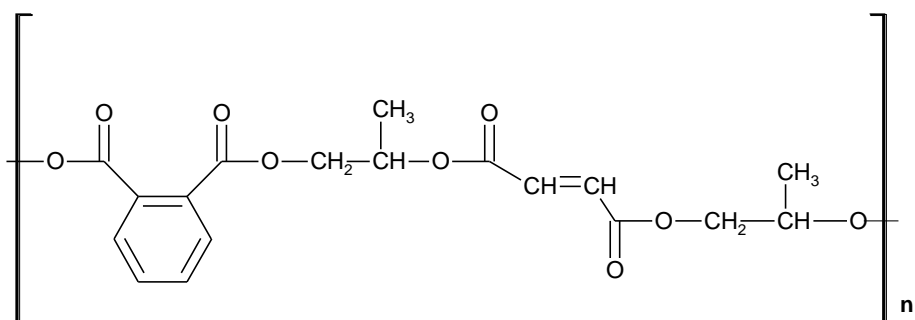


Figura 6. Estructura de una resina poliéster orto ftálica

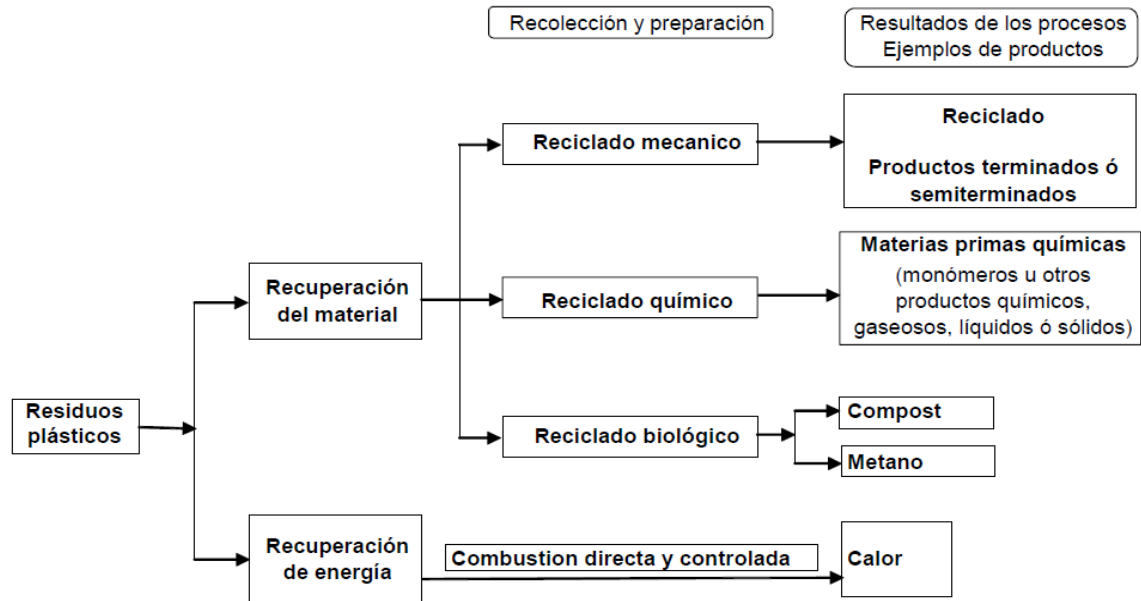


## 1.4 RECICLAJE DE POLÍMEROS

Las posibles vías de reutilización de los plásticos son varias y de diferente naturaleza abarcando desde su reciclado directo, incineración, con o sin recuperación de energía hasta su transformación en productos más nobles. El reciclado persigue rentabilizar el residuo transformándolo bien en nuevos productos plásticos (reciclado mecánico) o bien en materia prima química o en combustibles (reciclado químico) (Arandes, 2004).

**1.4.1 Métodos de reciclaje de plásticos.** Después de que un plástico pasa a ser desecho le esperan cuatro posibles vías: el vertido, reciclado mecánico, recuperación energética y reciclado químico. La primera de ellas es la que efectúa el consumidor y la muestra más cercana está en los basureros municipales y de allí pasan a la incineración, que es otro duro golpe al ambiente (Fernández, 2001).

Figura 7. Diagrama ilustrativo de las opciones de recuperación, los procesos y el resultado sobre la recuperación de los residuos plásticos.



Fuente: Plastivida, 2009.

- Reciclado mecánico** Con este tipo de reciclado se consigue recuperar el residuo plástico al ciclo de consumo como materia prima para nuevas aplicaciones, en procesos de fabricación de bolsas de basura, maceteros, contenedores para frutas y hortalizas, mobiliario urbano, postes, etc. El proceso de tratamiento consiste en la recogida y la selección de los plásticos y la trituración, para terminar el proceso con la obtención de lentejas de plástico, denominadas granza. La granza así obtenida será objeto de modificaciones para proporcionarle las características deseadas. Seguido, se procede a su transformación por acción del calor y/o presión. Dependiendo del material objeto de reciclado y de la tecnología utilizada el proceso de tratamiento puede presentar ligeras variaciones.

- **Recuperación energética** Implica aprovechar el alto poder calórico de los plásticos recuperando su energía a través de la incineración en hornos especialmente diseñados a tal fin con la máxima tecnología y regulación internacional. Este proceso no implica mayor contaminación ya que se obtienen como residuos gaseosos exclusivamente dióxido de carbono y vapor de agua, tratándose además los residuos líquidos en plantas de tratamiento de efluentes.
- **Reciclado químico** Implica descomponer los plásticos y reducirlos hasta sustancias químicas sencillas. El objetivo es recuperar esos componentes químicos individuales para reutilizarlos como químicos o producir nuevos plásticos con las mismas características y propiedades de los materiales vírgenes. Hay distintos procesos desarrollados y en permanente optimización: metanólisis, glicólisis, hidrólisis, pirólisis, crackeo térmico (Plastivida, 2007).

## 1.5 AGLOMERADO O MADERA PLÁSTICA

La madera plástica es un material compuesto, formado por una matriz plástica y un material de refuerzo, posee propiedades similares a la madera convencional, se puede mediante extrusión convertir en perfiles de distintas dimensiones, en diferentes colores y texturas, se pueden realizar trabajos similares a los realizados en madera natural y con las mismas herramientas; algunas de las principales características son:

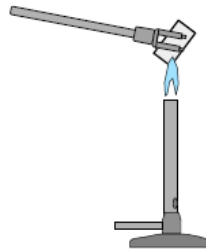
- Los productos en madera plástica son duraderos al tiempo, se pueden lavar, son inmunes a diferentes agentes bacterianos y hongos, son resistentes químicamente, mecánicamente y no presentan fácil corrosión.
- Los perfiles de madera plástica se pueden tratar como madera convencional, por ello se pueden perforar, fresar, atornillar, introducir clavos metálicos, se pueden cortar e inclusive tallar.
- Son muy resistentes y de larga vida útil.

- El factor fundamental de la elaboración de productos en madera plástica es el ecológico, debido a que con este proceso se evita gastar recursos naturales no renovables, impidiendo la contaminación y disminuyendo la velocidad del cambio climático.

### 1.5.1 Caracterización de los aglomerados.

- **Test de la llama** Este test permite observar el comportamiento del material ante la llama, consiste en tomar una pequeña cantidad del material y someterlo a la acción de la llama; para esto se puede utilizar un mechero bunsen con la entrada del gas al mínimo y se puede analizar la inflamabilidad del material dentro y fuera de la llama, si se enciende o si se forman vapores (Sorenson, 1961).

Figura 8. Test de la llama

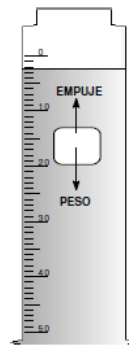


Fuente. Roa, 2008

- **Degradación Química** Para el caso, se ha de estudiar el efecto que tienen diversos agentes químicos (ácidos, bases) sobre las propiedades físicas y químicas de los aglomerados.
- **Densidad** El método más intuitivo para calcular la densidad de un sólido es calcular su masa, su volumen y efectuar el cociente entre ellos. Se puede calcular el volumen del sólido a partir de sus dimensiones si se trata de

cuerpos geométricos conocidos, de lo contrario, es necesario usar el principio de Arquímedes; el cual permite encontrar una relación entre la masa y el volumen de un objeto, mediante la observación de la cantidad de volumen desplazado cuando se sumerge el sólido en un líquido (Sorenson, 1961).

Figura 9. Medición de la densidad de un objeto utilizando el principio de Arquímedes



Fuente. Roa, 2008

- **Propiedades Mecánicas** Un modelo de resistencia de materiales establece una relación entre la fuerza aplicada, también llamadas cargas o acciones y los esfuerzos o desplazamientos inducidos por ellas. Típicamente las simplificaciones geométricas y las restricciones impuestas sobre el modo de aplicación de las cargas hacen que el campo de deformaciones y tensiones sean sencillos de calcular (Seymour, 1995).
- **Dureza** La dureza da una medida de la resistencia de los materiales a la deformación plástica localizada, como puede ser la resistencia a ser rayados por otro material más duro, o a que un penetrador genere una huella superficial cuando se aplica de forma controlada una carga. (Ardila, 2010).

- **Ensayo de compresión** Es un ensayo mecánico esfuerzo-deformación. Normalmente se deforma una probeta del material de dimensiones conocidas hasta la rotura, con una fuerza de compresión que aumenta gradualmente, la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza. Para mayor información ver anexo 1.
- **Ensayo de Impacto** Mide el nivel de resistencia de un material ante un choque o golpe intenso y repentino. Este ensayo se realiza utilizando un péndulo pesado que parte de una altura  $h_o$ , gira describiendo un arco, golpea y rompe la probeta, alcanzando una elevación menor al final  $h_f$ . Para calcular la energía de impacto del material, se determina la diferencia de elevación inicial y final del péndulo utilizado antes y después de golpear la probeta. Con esta diferencia de alturas del péndulo, se determina la diferencia de energías potenciales que es directamente proporcional a la energía de impacto absorbida por la probeta durante la ruptura. La capacidad de un material para resistir el impacto se denomina tenacidad (Owen, 2010). Para mayor información ver anexo 1.
- **Ensayo de Flexión** Es el efecto o deformación que sufre una viga bajo carga transversal. La resistencia a la flexión o esfuerzo flector se denomina como módulo de rotura; se expresa en  $\text{Kg-f/cm}^2$  o MPa.

El momento flector es el efecto de una carga transversal sobre un punto definido de una viga. Usualmente se designa como M, depende de las distancias de aplicación de cada una de las cargas.

Una viga al ser sometida a flexión experimenta tanto esfuerzos de compresión como de tensión en la misma sección transversal. Para vigas de sección prismática y material homogéneo, el eje neutro corresponde al centroide de la sección transversal de la viga y los esfuerzos de tensión y

compresión máximos se presentan en la parte superior e interior respectivamente.

La resistencia a la flexión máxima viene dada por la ecuación:

$$\sigma_f = (3FI)/(2bh^2)$$

Donde:

$\sigma_f$  = Módulo de ruptura (MPa)

F = Carga de rotura (N).

l = Distancia entre soportes de apoyo (mm).

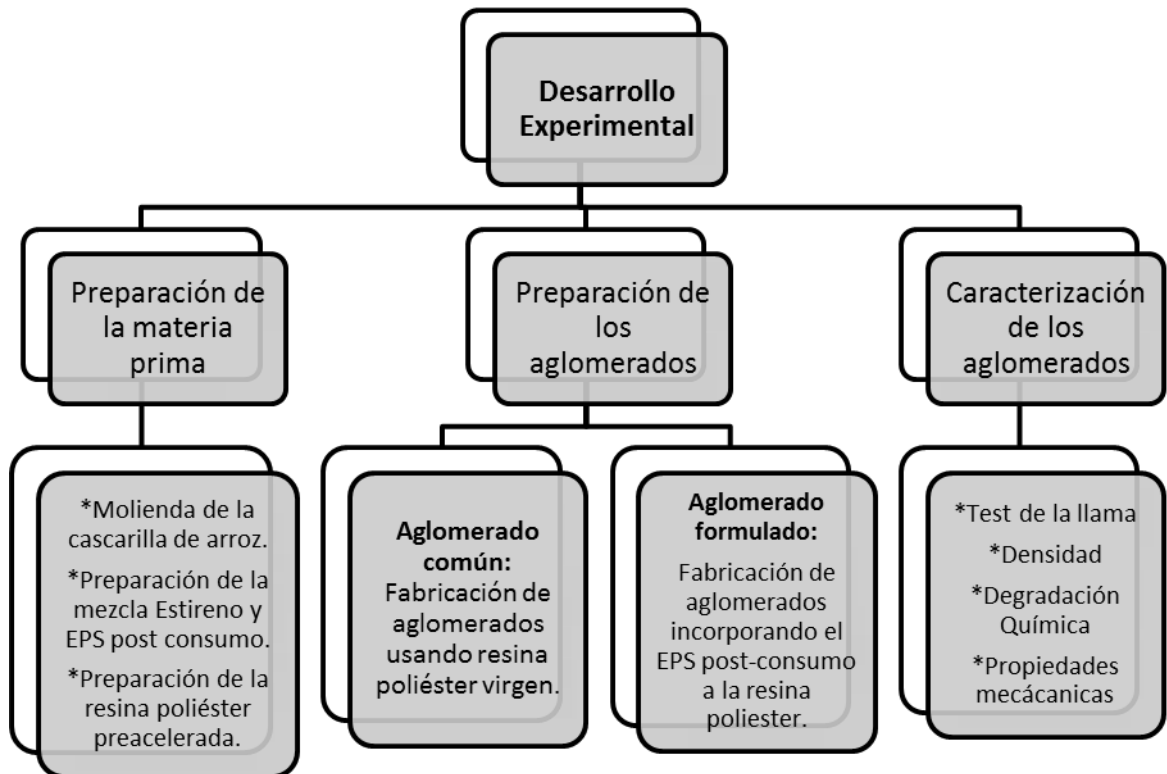
b = ancho de la muestra (mm).

h = Espesor de la muestra (mm).

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la figura 10 se muestra un esquema general del proceso seguido en el desarrollo experimental.

Figura 10. Esquema general del desarrollo experimental



La cascarilla de arroz fue recolectada de las bodegas de una arrocera de Bucaramanga y el EPS se tomó de los residuos de embalaje. Por su parte, la resina virgen y el estireno fueron proveídos de los recursos que posee el laboratorio de química industrial.

## 2.1 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Se molió la cascarilla de arroz en un molino de cuchillas hasta obtener material de tamaño de partícula menor o igual a 425  $\mu\text{m}$  (35 mesh) y se secó a 100 °C durante 4 horas.

**2.1.1 Disolución EPS post-consumo en Estireno (EPS-Es).** La posibilidad de usar diferentes solventes como medio de disolución del EPS post-consumo es amplia gracias a la compatibilidad química que este tiene con diferentes compuestos orgánicos como los de tipo aromático; sin embargo, teniendo en cuenta que el estireno es el monómero del EPS post-consumo, funciona como reductor de la viscosidad de la resina poliéster virgen, participa como agente de enlace molecular en la reacción de polimerización de la resina, se consigue con facilidad gracias a la disponibilidad en el mercado y según las pruebas de solubilidad ya realizadas en otras investigaciones a diferentes proporciones soluto/solvente<sup>2</sup> (EPS post-consumo/Estireno); se optó por disolver el EPS en estireno comercial bajo una relación en %p/p de 66,67%/33,33% de Es/EPS respectivamente. Esta relación composicional fue la que permitió obtener una mezcla de apariencia (consistencia, viscosidad y ausencia de burbujas) similar a la resina poliéster, un requisito importante a cumplir, bajo la consideración de que esta mezcla posteriormente fue utilizada para rebajar la cantidad de resina necesaria en la fabricación de los aglomerados formulados y así obtener materiales en los que se le diera utilidad al polímero post-consumo.

**2.1.2 Preparación de la resina poliéster pre acelerada (RPP).** Se preparó una formulación en % p/p para obtener 257,7 g de RPP, por ello, se tomaron 75 g de estireno y 175 g de resina poliéster, luego se le adicionó 7,7 g de naftenato de

---

<sup>2</sup> Pruebas de solubilidad efectuadas por Pachón 2008, empleando xileno, tolueno y estireno.

cobalto y así se obtuvo la RPP. Todo esto se agitó hasta obtener una mezcla completamente homogénea.

## 2.2 ELABORACIÓN DE LOS AGLOMERADOS

**2.2.1 Aglomerado común.** A la RPP se le adicionó un volumen de MEK-P, realizando una buena agitación, con el objeto de conseguir una mezcla totalmente homogénea y lograr llevar a cabo un satisfactorio proceso de polimerización. Luego, a la mezcla anterior se le añadió la carga (cascarilla de arroz molida); posteriormente, todo el conjunto fue llevado a un molde para ser prensado bajo una presión de 356 lb/pulg<sup>2</sup>, durante 20 minutos en una prensa hidráulica. Finalmente, los aglomerados se llevaron a la estufa para ser horneados y obtener los aglomerados con las características finales. Las proporciones *RPP – carga*, se variaron realizando los ensayos mostrados en la tabla 4, para finalmente elegir la composición que cumpliera la condición de que al prensar el conjunto no presentara mayor exudación del fluido, buscando tener pérdida mínima de la matriz polimérica, uniformidad estructural, buena adherencia por borde de grano y una terminación lisa en la superficie de contacto con el molde.

Tabla 4. Ensayos con las diferentes proporciones de los aglomerados

Numero de Muestra $\Rightarrow$	1C	2C	3C	4C	5C	6C
% P/P Componente						
<b>RPP</b>	30	40	45	50	55	60
<b>Cascarilla de arroz</b>	70	60	55	50	45	40

**2.2.2 Aglomerado Formulado.** Para obtener el aglomerado que integrara en su composición el polímero post-consumo (EPS) se procedió a preparar la mezcla de EPS-Es en RPP en una relación 30/70 %p/p respectivamente (González, 2010), para obtener la dispersión de EPS-Es en RPP, importante realizar una completa agitación para lograr una compactación e integración de los componentes. Luego, se trató la presente dispersión como se hizo con la RPP en el numeral 2.2.1 efectuando los ensayos bajo las composiciones que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Ensayos con las diferentes proporciones de los aglomerados formulados

Numero de Muestra % P/P Componente	1F	2F	3F	4F	5F	6F
<b>RPP+EPS</b>	30	40	45	50	55	60
<b>Cascarilla de arroz</b>	70	60	55	50	45	40

Entonces, es importante esclarecer que el aglomerado común fabricó con una matriz polimérica formada por resina poliéster virgen, mientras que en el formulado, se reemplazó una parte de la resina virgen de la matriz polimérica por poliestireno post-consumo. Este ahorro en términos de material polimérico empleado, es fundamental y permite justificar el presente estudio, ya que usando un polímero post-consumo se da la posibilidad de obtener un material con características similares y de menor costo que el común.

## 2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS

Después de haber fabricado los aglomerados según las diferentes composiciones, se escogió la mejor muestra de cada uno de ellos (tanto *común* como *formulados*), en cuanto a sus características en su apariencia física, dureza y buena compactación para proceder a someterlos a las siguientes pruebas de caracterización.

**2.3.1 Test de la llama.** Los aglomerados obtenidos fueron sometidos al contacto directo con la llama para observar los cambios producidos en ellos.

**2.3.2 Comportamiento térmico.** Mediante la utilización de un fusiómetro fue revisado el comportamiento térmico de los aglomerados *común* y *formulado*. Ambos fueron sometidos a un barrido de temperatura desde 25°C a 300°C y se fue registrando periódicamente el cambio en su apariencia física, temperatura de ablandamiento y otras características.

**2.3.3 Pruebas de degradación química.** Con el objeto de revisar como variaba la apariencia y que resistencia química tenían los aglomerados, estos fueron puestos en contacto con diversas sustancias químicas a una temperatura ambiente durante un tiempo de 7 días. Para la aplicación de la prueba se empleó agua, aceite mineral y soluciones al 10% P/V de hidróxido de sodio, ácido nítrico y ácido sulfúrico. Esto se hace con la intención de buscar usos potenciales para el material desarrollado.

**2.3.4 Determinación de la densidad.** Los aglomerados fueron pesados y para la determinación de su volumen se empleó el método de Arquímedes para obtener el volumen más cercano (teniendo en cuenta que los aglomerados pudieron quedar con algunos pequeños espacios internos o cavidades) y finalmente proceder a obtener una densidad promedio.

**2.3.5 Determinación de las propiedades mecánicas.** Los aglomerados fueron sometidos a pruebas de dureza, resistencia a la compresión e impacto de acuerdo a los protocolos establecidos y seguidos para este tipo de materiales, en los laboratorios de análisis de materiales de la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

- **Dureza** Haciendo uso de un durómetro tipo D que es usado para materiales de alta dureza, se realizó la medición de la dureza de los aglomerados, basándose en la deformación en el punto de presión generado por la presión ejercida por el instrumento sobre la parte más plana (base) de las probetas cilíndricas de los aglomerados.
- **Ensayo de compresión** Las probetas de los aglomerados se fallaron en la máquina universal de ensayos Amsler de acuerdo a la norma ASTM D 695 (Ver anexo 1). La geometría de las muestras fue cilíndrica.

- **Ensayo de impacto** El ensayo de impacto fue realizado empleando el péndulo de Charpy, en el equipo de ensayos TREBEL, usando probetas rectangulares y de acuerdo a lo contemplado en la norma ASTM D 256 (ver anexo 1).
- **Ensayo de flexión** Para este ensayo se tomó material aglomerado y se fabricaron probetas con forma de tableta rectangular, se efectuó mediante una máquina de ensayos de referencia MTS 810 (Material Test System), para medir su flexibilidad, siguiendo la norma ASTM –D790 (anexo 1).

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 TRANSFORMACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.

La cascarilla de arroz molida quedó bajo la apariencia física mostrada en la figura 11, con una granulometría de 425  $\mu\text{m}$ , con forma similar a lo que se conoce como harina de madera (polvo). Finalmente se obtuvo un material finamente dividido y seco. Es de suma importancia haber eliminado la humedad del material, puesto que la resina poliéster es hidrófuga y por ende no sirve como aglomerante de cargas húmedas, en consecuencia, al intentar fabricar aglomerados en estas condiciones, solo se consiguen productos con poca dureza y con fisuras en su estructura.

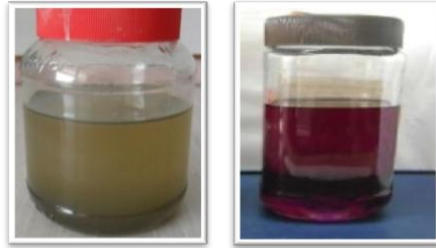
Figura 11. Cascarilla de arroz molida



##### 3.1.1 Disolución EPS post-consumo en Estireno (EPS-Es).

Bajo la temperatura ambiente,  $\pm 25$   $^{\circ}\text{C}$ , se llevó a cabo una completa disolución del EPS post-consumo en el estireno y como se puede observar en la figura 12 (izquierda) la mezcla quedó con una apariencia en cuanto a consistencia y viscosidad, similar a la resina poliéster.

Figura 12. Izq. EPS post-consumo disuelto en estireno, der. Resina Poliéster pre acelerada.



Se ha elegido el estireno como solvente para transformar el EPS post-consumo apoyándose en estudios realizados y porque participa activamente en la polimerización de la resina poliéster como agente de entrecruzamiento, pues queda incluido en las cadenas poliméricas del producto final, además, sirve como diluyente para las moléculas del poliéster, es el menos costoso y el más común de los monómeros de entrecruzamiento.

### **3.2 FABRICACIÓN DE AGLOMERADOS**

Para la determinación de las mejores condiciones de algunos de los factores mas influyentes en la fabricación de los aglomerados (presión, tiempo de prensado, composición) fue necesario realizar varias probetas como ensayos preliminares con diferentes presiones y tiempos para el moldeo de los aglomerados hasta encontrar las más aceptables para el desarrollo del trabajo. Para el caso de la presión, se hace importante precisar que la aplicación de una presión superior a  $356 \text{ lb/pulg}^2$  conllevaba a que se exudara mucha resina e indiscutiblemente se perdiera matriz polimérica, algo poco ventajoso para la fabricación; aparte de eso, conducía a la obtención de muestras muy secas que presentaban muy poco empaquetamiento compacto. Por su parte, en términos del tiempo de aplicación de la presión, se hace imprescindible permitir que el fraguado de la resina se realice en el momento del prensado para que el material tome la forma deseada y quede con la suficiente consistencia, por ello es necesario darle el tiempo requerido para

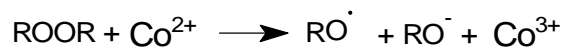
que este proceso se cumpla plenamente (de ahí que se haya estipulado un tiempo prudencial de 20 minutos en los que se pueden realizar cómodamente todas las operaciones para obtener el aglomerado). En la figura 13 se pueden observar algunas de las probetas realizadas previamente en los ensayos preliminares hasta encontrar los valores óptimos para la generación de un buen material.

Figura 13. Aglomerados fabricados inicialmente



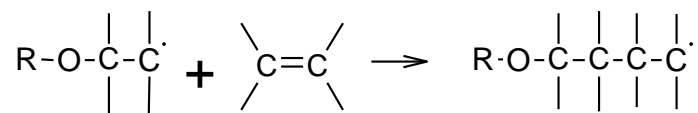
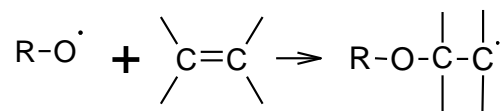
Los procesos de polimerización que conducen a la generación de estos nuevos materiales ocurren mediante reacciones químicas de adición, puesto que participan las insaturaciones de la resina poliéster (sitio activo), así como las del estireno. Los radicales libres son suministrados por el MEK-P (iniciador), que bajo la acción de una sal de cobalto como el Naftenato de Cobalto (catalizador que permite la descomposición controlada del MEK-P) se convierte en la fuente de los radicales para que suceda la reacción de adición.

La polimerización se da en una etapa inicial, que suele llamarse iniciación por descomposición química del iniciador; allí intervienen dos especies químicas, iniciador y catalizador, el primero actúa como oxidante y por tanto se reduce durante el proceso reactivo; el segundo actúa como reductor y por ende se oxida, haciendo que en el proceso redox se formen los radicales libres provenientes del iniciador (Ramis, 1993). Entonces, el MEK-P combinado con el Naftenato de Cobalto como agente reductor, presenta el siguiente proceso redox:



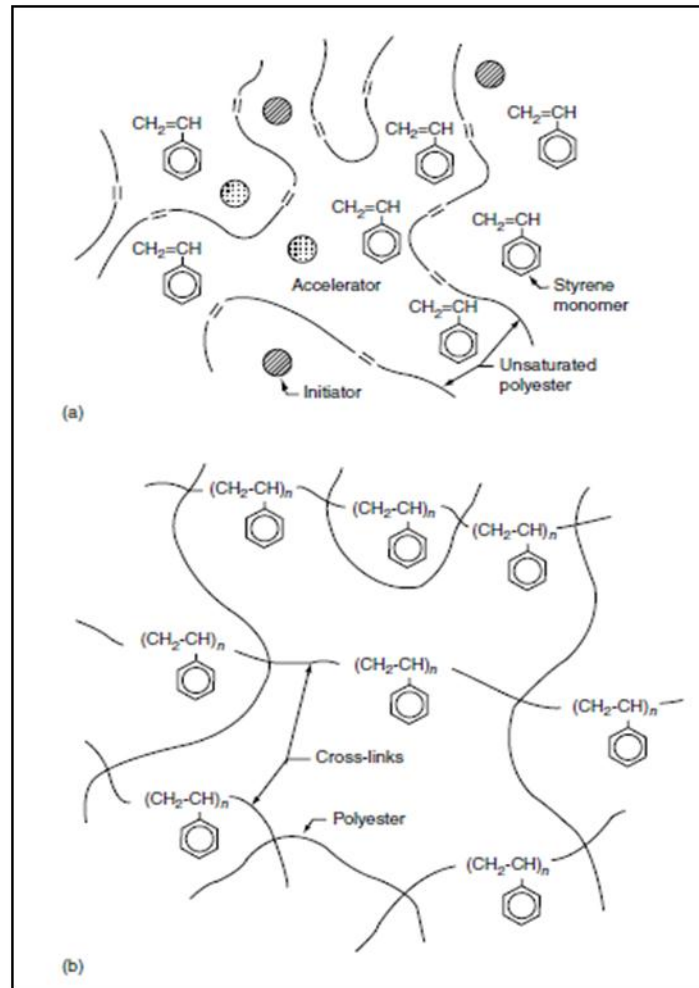
Seguidamente, se presenta la etapa de propagación, allí los radicales  $\text{RO}^\cdot$  inician la polimerización, abriendo los dobles enlaces (formándose nuevos radicales libres), éstos pueden reaccionar bien con el estireno presente o bien con el poliéster, y a partir de ahí las cadenas del polímero irán creciendo y entrecruzándose con la posibilidad de que se den procesos de copolimerización estireno-poliéster y homopolimerización del estireno. En la figura 14 se muestra la reacción correspondiente y en la figura 15 se puede apreciar un esquema ilustrativo de la generación de la red tridimensional producto de la polimerización.

Figura 14. Reacción proceso de polimerización



Fuente: Bunsell, 2005

Figura 15. Ilustración de la formación de la red tridimensional producto de la polimerización de la resina. a) Especies químicas participantes de la reacción. b) Estructura entrecruzada producto de la reacción de adición



Fuente: Manas, 2006.

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

De esta manera, cuando unas cadenas se unen con otras vecinas a través de otras cadenas de igual o diferente naturaleza se llega a obtener una red tridimensional, se puede denominar que se han de establecer para quedar como un polímero atáctico puesto que por las diferentes posibilidades de homopolimerización o copolimerización, en términos de la configuración, los sustituyentes pueden quedar al azar.

**3.2.1 Aglomerado común.** Elaboradas las seis muestras de aglomerados mencionadas en la tabla 3 y según la apariencia física y el comportamiento de las muestras en la fase de su fabricación (incorporación de la resina con la carga), fue muy notorio que las composiciones de las muestras denominadas 1C y 2C no corresponden a las más adecuadas para la obtención de aglomerados con características similares a la madera plástica puesto que el exceso de fibra conduce a la generación de materiales muy secos (en términos de ausencia de matriz polimérica) haciendo que en la etapa de prensado para el moldeo se obtuvieran materiales en los que la cascarilla de arroz se desmoronara y entonces empezara a disgregarse el material aglomerado (figura 16). Por ende estas muestras fueron descartadas para ser elegidas como aglomerados finales para caracterización.

Figura 16. Muestra de los aglomerados 1C y 2C



Pasando al aglomerado mencionado como 6C, en el extremo derecho de las composiciones de tabla 4, se observa que fueron realizados con exceso de matriz polimérica llevando a un material con mucha humectación, resina que nuevamente se pierde en la etapa de prensado y no se hace recomendable en términos de

costos para el trabajo. Caso contrario se generó con la fabricación de las muestras 3C, 4C y 5C que por su cercanía entre sí en los porcentajes de composición fueron aglomerados con características físicas similares, aclarando que 3C es un poco más seca y 5C tiende a irse al exceso de humedad. Por lo anterior, y para manejar valores precisos, la muestra 4C fue elegida como la más cercana a un aglomerado con las particularidades de la madera plástica, con estas condiciones se logró un material con un buen comportamiento en cuanto a cohesión y compactación de la fibra vegetal. Entonces, 4C fue escogida para posteriormente caracterizarla con las pruebas que se describen en el numeral 1.5.1 y en adelante en este libro se le mencionará como C.

**3.2.2 Aglomerado formulado.** Puesto que en la preparación del aglomerado formulado se incluyó como parte de la matriz polimérica al poliestireno post-consumo (EPS-Es), se hizo obligatorio asegurarse que la adición de tal polímero a la RPP no generara una inhibición o retardo de la polimerización de la matriz polimérica final: RPP/EPS-Es para este caso. En consecuencia, se procedió a adicionar el EPS-Es sobre la RPP para generar la nueva matriz polimérica (figura 17).

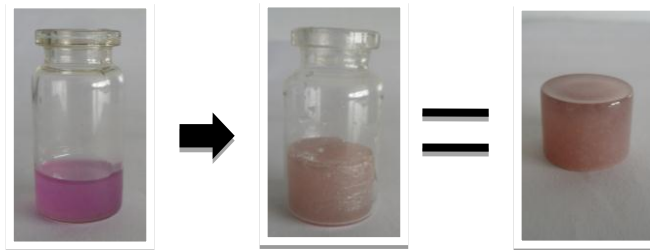
Figura 17. Matriz polimérica RPP/EPS-Es



Al hacer una comparación entre la figura 12 derecha y la figura 17, se nota que la nueva matriz polimérica es un poco más clara en cuanto a la disminución de la intensidad del color violeta, naturalmente generado por la introducción del EPS-Es que por aparte es de un tono más claro (figura 12 Izquierda).

Posteriormente, se continuó con la polimerización de la mezcla de la figura 17, haciendo uso del MEK-P y se revisó si efectivamente ocurría tal proceso. Se obtuvo un material duro con apariencia similar a una pasta dura con forma cilíndrica (según molde empleado, figura 18) y así se avaló el uso de la nueva matriz polimérica como parte de los aglomerados formulados, empleándose entonces un método para el reciclaje del poliestireno post-consumo.

Figura 18. Matriz polimérica (RPP/EPS-Es) polimerizada



Es posible considerar al producto de la combinación de la RPP y EPS-Es como una aleación polimérica, donde el material post-consumo entra a formar parte de una dispersión con la resina poliéster, quedando encapsulado dentro de la red polimérica formada generando un producto con características similares al resultado de la polimerización de solo la resina poliéster, pero con la suma importancia de que se están rebajando los costos.

Así se revalidó que la relación peso a peso en la matriz polimérica que corresponde a 70% RPP y 30% de EPS-Es, es una buena proporción puesto que se consiguió un sistema monofásico y sin cúmulos de aire, evidenciados porque no aparecieron de burbujas en su estructura.

Habiendo confirmado la polimerización de la mezcla RPP/EPS-Es; se fabricaron los aglomerados mencionados en la tabla 5; los correspondientes a 1F y 2F por tener un bajo porcentaje de RPP/EPS-Es; manifestaron una nula adherencia entre las fibras, puesto que el exceso de carga en la mezclas obligaba a que la matriz

polimérica no las lograra inundar completamente, quedándose fibras vegetales sueltas que conllevaron a su rotura inmediata. Por su parte, la muestra 6F, presentó un exceso de material aglomerante (muestra muy húmeda), por ende pérdidas de éste en el prensado y bajo grado de compactación, conduciendo a una muestra con una notable fragilidad lo que la hacía inadecuada para posteriores aplicaciones. Todas las anteriores muestras fueron suprimidas para ser elegidas como aglomerado formulado de comparación. Caso contrario, nuevamente ocurrido con las muestras 3F, 4F y 5F ya que fueron los que más se asemejaron a la madera plástica; para hacer que este proceso de fabricación fuera lo más similar al efectuado para el desarrollo de los aglomerados tipo C y así poder compararlos, se optó entonces por elegir la muestra 4F (que en adelante se mencionará como F) como la mejor y más apta para proceder a aplicarle los métodos de caracterización y compararla con la muestra C.

### **3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS**

Habiendo elegido a C y F como los aglomerados tanto del tipo común como formulados, se procedió a repetir la elaboración de cada uno siguiendo los parámetros ya mencionados obteniéndose varias muestras (figura 19) de ellos, que fueron empleadas en la aplicación de las pruebas para su caracterización y comparación entre sí.

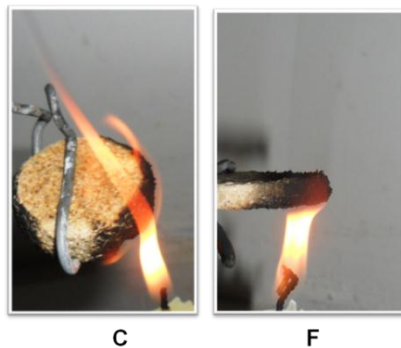
Figura 19. Algunos de los aglomerados C y F



### 3.3.1 Test de la llama.

Cada uno de los aglomerados fue sometido a la acción de la llama, la figura 20 ilustra el ensayo. En las dos muestras se observó una llama de combustión amarilla fuliginosa, auto extinguido al momento de retirar el aglomerado de la ignición (propiedad de la cascarilla de arroz), se generó humo y se percibieron olores penetrantes como a plástico y madera quemada, sobre todo en F, donde se podía distinguir el olor del quemado del EPS. Algunos de estos vapores pudieron ser debidos a la presencia de compuestos volátiles generados durante la combustión. Las muestras se fueron calcinando hasta quedar como residuos las cenizas.

Figura 20. Prueba de Ignición



**3.3.2 Comportamiento térmico.** En la tabla 6, se muestran los cambios observados en los aglomerados C y F durante su exposición a un barrido de temperaturas desde 25°C hasta 300°C.

Tabla 6. Comportamiento térmico de los aglomerados C y F

Temperatura (°C)	Cambio observado en C	Cambio observado en F
25→80	Según el criterio ocular, no se presentan cambios en la estructura de los aglomerados.	
127	_____	Se empieza a notar un ablandamiento leve de su superficie.
132	Se empieza a notar un ablandamiento leve de su superficie.	_____
175	Presentan una consistencia más débil debido al aumento del ablandamiento de su superficie, pero no permiten su penetración.	
180	Se inicia la producción de un cambio de color en la superficie, se pasa a un tono más oscuro. Pierden la apariencia lustrosa.	
210	Resequedad en las muestras y obliga a que se empiece a desmoronar la fibra aglomerada más externa.	
218	Se aumenta el nivel de ablandamiento y se deja penetrar de manera parcial.	Al aplicársele una pequeña fuerza para revisar su ablandamiento, éste se divide inmediatamente, pese a que solo su parte más externa es la que ha sufrido los mayores cambios físicos.
222	A la aplicación de una mínima fuerza para revisar su ablandamiento, éste se divide inmediatamente, pese a que solo su parte más externa es la que ha sufrido los mayores cambios físicos.  La superficie se torna de un tono más oscuro y tiende a una coloración negra.	Su superficie se torna más oscura incluso más negra que C.
300	En su parte más exterior, ambos aglomerados se tornan “quemados”, sin embargo al revisar su interior se nota que una mínima sección todavía conserva una apariencia blanda y su tonalidad inicial.	

Revisando consecuentemente las variaciones frente al cambio de temperatura, es notorio que los aglomerados presentan un comportamiento similar entre sí, no obstante, el C tiende a resistir unos cuantos grados por encima de F, pero, esto no obliga a descalificar al formulado. El cambio ligero en la temperatura de reblandecimiento los aglomerados es un indicativo de que en el proceso de polimerización de C, se han generado mayores o mejores entrecruzamientos químicos consiguiendo un reticulado superior que en F; es posible que la incorporación del EPS sobre la matriz polimérica no conduzca a una reticulación uniforme en el producto final, dificultando un mejor empaquetamiento de la cascarilla de arroz, haciendo más susceptible a F a la acción de las altas temperaturas.

Reconociendo que la fabricación de los materiales compuestos aglomerados tiene como objetivo obtener productos con propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de los constituyentes actuando aisladamente<sup>3</sup>, a manera de ejemplo, se puede comparar a C y a F con la resina poliéster (la temperatura a la cual empieza a disminuir su rigidez es 110°C)<sup>4</sup> y es notorio que estos materiales han logrado superar esta temperatura, pues como se ve en la tabla 6, para ambos aglomerados su ablandamiento empieza por encima de los 120 °C, por ende se ha cumplido uno de los puntos que impulsa a científicos e investigadores a crear y construir nuevos materiales aglomerados (mencionado al inicio del párrafo) y desde la perspectiva ambiental, con el aglomerado F, se ha logrado la inclusión del reciclaje de material post-consumo superando una de las propiedades que la resina poliéster presenta de manera separada; por su parte, el poliestireno pierde su resistencia sobre los 90°C, y nuevamente, comparando a F con este, es notorio que la temperatura a la que empieza a disminuir la rigidez del aglomerado es superior a la ya mencionada.

Siendo la resina poliéster un material termoestable y el poliestireno un material termoplástico, se consiguen aglomerados con características diferentes de los materiales de partida, que gracias a ese nuevo “enmallado” entre las moléculas de la matriz polimérica como entre la matriz polimérica y la carga, se les confiere mayor rango de temperatura en el que permanecen inalterados.

Las macromoléculas orgánicas son estables hasta ciertos rangos de temperatura y cuando se eleva la temperatura de forma relevante, tienden a descomponerse en pequeños fragmentos, iniciando por la rotura de enlaces con una baja energía de disociación.

---

<sup>3</sup>PARIS, Federico, y CAÑAS, José. Introducción a los materiales compuestos. En: Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos. Sevilla, 2006. p.2.

<sup>4</sup> Ibid., p. 9.

**3.3.3 Densidad.** En las tablas 7 y 8, se encuentran consignados los resultados correspondientes. Se efectuaron tres probetas similares por cada uno de los aglomerados a caracterizar, con el objeto de encontrar una densidad promedio.

Tabla 7. Pruebas de densidad aglomerado C

Muestra	Masa (g)	Volumen Desplazado (mL)	Densidad (g/mL)
C-1	5,1	4,1	1,24
C-2	5,1	4,0	1,27
C-3	5,1	4,0	1,27
			$\rho_{pro}=1,26$

Tabla 8. Pruebas de densidad aglomerado F

Muestra	Masa (g)	Volumen Desplazado (mL)	Densidad (g/mL)
F-1	5	4,7	1,06
F-2	5	4,8	1,04
F-3	5	4,7	1,06
			$\rho_{pro}=1,06$

Es importante mencionar que este método fue necesario implementarlo, ya que muchos materiales poliméricos a nivel estructural poseen huecos espaciados a modo de poros o imperfecciones y estas circunstancias evitan obtener un valor real o casi cercano a la verdadera densidad del material.

Por los resultados mostrados en las tablas 7 y 8 se reconoce que el aglomerado F presenta una menor densidad que el aglomerado C, esto también concuerda con lo observado cuando se sumergían los aglomerados en el agua al momento de hacer la medición; mientras que C se iba al fondo del recipiente, F se sumergía con menos rapidez y una pequeña parte de su estructura quedaba flotando sobre el líquido, de ahí entonces que se note que la densidad de F es ligeramente superior a la del agua (a temperatura ambiente).

Una característica esencial de los aglomerados es que tengan una baja densidad, así se permite diseñar posteriormente piezas ligeras, de buena rigidez para que incluso su transporte se haga más sencillo (Viladoms, 2003).

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

**3.3.4 Degradación química.** En la tabla 9, se muestra un resumen de los cambios observados en C y F al momento de ser puestos en diferentes reactivos químicos.

Tabla 9. Resistencia química de los aglomerados

Reactivo	Aglomerado	
	C	F
NaOH	La solución se tornó amarilla y se observó un continuo ataque sobre la fibra por ende, se desintegró completamente	La solución se tornó amarilla, flotó parcialmente y se observó un continuo ataque sobre la fibra llevando a la desintegración completa
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Permaneció inalterado	Flotó parcialmente y permaneció inalterado
HNO <sub>3</sub>	La solución se tornó amarilla y se presentó un ligero ataque en el que se debilitó, y se disgregó parcialmente	Flotó parcialmente, la solución se tornó amarilla y se presentó una desintegración parcial que al paso del tiempo fue total
Aceite Mineral	Permaneció inalterado	Permaneció inalterado
H <sub>2</sub> O	Permaneció inalterado	Flotó parcialmente y permaneció inalterado

A manera de comparación se decidió a fabricar probetas pequeñas de las matrices poliméricas por separado: RPP y RPP/EPS-Es, para exponerlas a los anteriores reactivos para considerar los posibles efectos de ellos y también compararlos con los aglomerados. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Resistencia química de las matrices poliméricas

Reactivo	Matriz Polimérica	
	RPP	RPP/EPS-Es
NaOH	Permaneció inalterado	Permaneció inalterado
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Permaneció inalterado	Permaneció inalterado
HNO <sub>3</sub>	Permaneció inalterado	Permaneció inalterado
Aceite Mineral	Permaneció inalterado	Permaneció inalterado
H <sub>2</sub> O	Permaneció Inalterado	Permaneció Inalterado

Los resultados anteriores, sirven para ser empleados como patrón de referencia para el análisis de la resistencia de los aglomerados C y F, frente a la acción de algunos reactivos químicos.

Refiriéndose inicialmente al agua y las soluciones acuosas; es lógico mencionar que la resina poliéster y el poliestireno por ser materiales hidrófugos no son compatibles con el agua, por ende ninguna de las matrices poliméricas por separado (tabla 10) fueron atacadas por la humedad y no se dio alteración alguna de su estructura al ser expuestas en contacto con esta. Los aglomerados C y F al tener contacto con agua no muestran un ligero ataque, no se “hinchan”; sin embargo, es posible que con el paso del tiempo el agua pueda llegar a introducirse propiamente en la cascarilla, debilitando la fortaleza de la estructura de los aglomerados, sin llegar a expandirlos; este efecto podría ser contrarrestado completamente si los aglomerados quedaran plenamente recubiertos en su parte más externa por las matrices poliméricas, es decir, sería muy significativo aplicar una capa externa de RPP sobre C o de RPP/EPS-Es sobre F para cubrir cualquier poro que pudiese estar presente en la superficie del material.

El aceite mineral no ataca a ninguna de las matrices poliméricas ni a los aglomerados (figura 22), esto además, permite pensar que estos nuevos

materiales podrían tener aplicaciones en actividades en las cuales tuvieran que tener contacto directo con aceite mineral; pese a que el poliestireno por separado puede verse afectado por la acción de compuestos orgánicos (tabla 1), al momento de entrar a formar parte de la matriz aglomerante (tabla 9 y 10) cambia sus propiedades para convertirse en un material estable al ser puesto en contacto propiamente con el aceite mineral.

Figura 21. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en agua

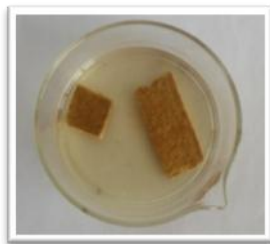


Figura 22. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en aceite mineral



En cuanto a la fuerza de los ácidos, es importante recordar que tanto el ácido nítrico como el sulfúrico son considerados como ácidos fuertes, en consecuencia los materiales son más susceptibles a ser atacados por estos. El ácido nítrico en las matrices poliméricas no logra causar daño, sin embargo, en los aglomerados conlleva al debilitamiento en C y a la disgregación en F (figura 23), mientras que el ácido sulfúrico (figura 24) no altera a ninguno de los materiales (ni a la matriz polimérica, ni a los aglomerados). Entonces, cada una de las matrices poliméricas cumple una función de protección de la fibra, no obstante, considerando la

posibilidad de la porosidad del aglomerado (hecho suficiente para que se dé el contacto de la fibra con el reactivo) se hace más probable que la fibra sea atacada por el ácido. La lignina y la celulosa son algunos de los componentes principales de la cascarilla de arroz, al estar sometidas al medio ácido pueden experimentar un ataque químico donde algunos enlaces intermoleculares e intramoleculares (las uniones glucosídicas de la celulosa como las éter intermonoméricas de la lignina son más lábiles en medio ácido) pueden verse afectados,<sup>5</sup> esto es lo que se conoce como la hidrólisis ácida de los enlaces glucosídicos de la celulosa (figura 25), generando la disminución en su grado de polimerización.

Figura 23. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en  $\text{HNO}_3$

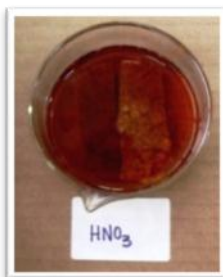


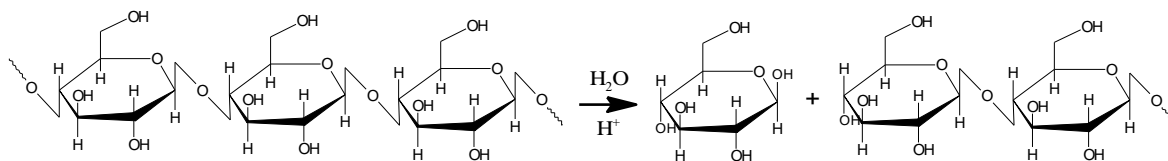
Figura 24. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en  $\text{H}_2\text{SO}_4$



---

<sup>5</sup> NUÑEZ, Carlos. PULPA Y PAPEL I. 7-Química de la Madera.7.3-Lignina. En: Pulpa y papel I. Argentina, 2008. p. 66. Disponible en: [www.cenunez.com.ar](http://www.cenunez.com.ar)

Figura 25. Representación de la hidrólisis ácida de la celulosa



El ácido nítrico, además de ser un ácido fuerte es un buen agente oxidante; así los grupos hidrocarbonados (celulosa) presentes en la fibra vegetal pueden sufrir reacciones de oxidación hasta degradarse o transformarse a otras moléculas (como algunos ácidos carboxílicos), un reflejo de que ha ocurrido esta variación, se asocia con el color amarillo que ha tomado la solución y la cascarilla, frente al ataque del ácido.

En medio básico, las matrices poliméricas muestran una suficiente resistencia al ataque, permaneciendo inalteradas, hecho contrario ocurre cuando los aglomerados son sometidos al ataque por una base (figura 26), ya que a pesar que el EPS y la RP presentan entre sus propiedades químicas gran resistencia a las bases fuertes, es evidente la degradación de las fibras por parte de las soluciones alcalinas, este ataque comprende no solo la ruptura de la estructura física sino que ocurre el hinchamiento e inserción de los grupos químicos de la solución los cuales rompen los enlaces intermoleculares y solvatan las moléculas simples<sup>6</sup>. Más específicamente, estos efectos son reflejados por la posible hidrólisis básica que puede sufrir la celulosa.

<sup>6</sup> NUÑEZ, Carlos. PULPA Y PAPEL I. 7-Química de la Madera.7.2-Celulosa. En: Pulpa y papel I. Argentina, 2008. p. 64. Disponible en: [www.cenunez.com.ar](http://www.cenunez.com.ar)

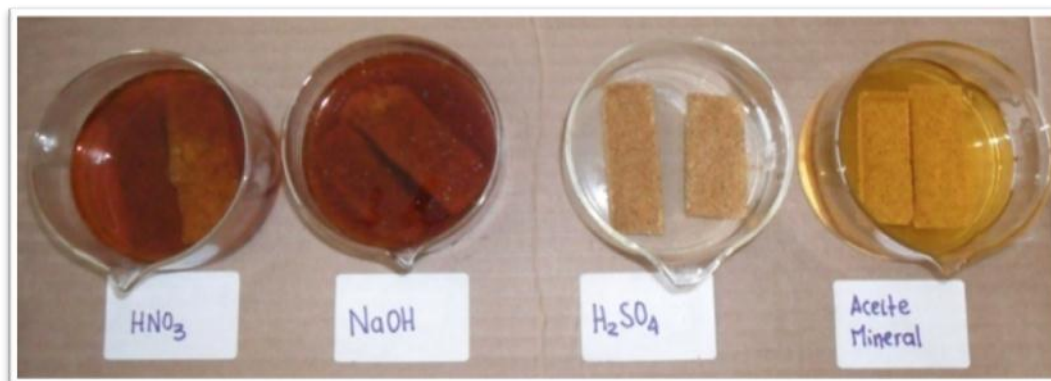
Figura 26. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en NaOH



La degradación de la fibra vegetal que compone la cascarilla de arroz, viene a afectar directamente las propiedades de resistencia mecánica del aglomerado, por ende, el debilitamiento de su estructura y la disgregación de las partículas de cascarilla.

En la figura 27, se muestra de manera condensada la acción de los reactivos (tabla 9) sobre los aglomerados.

Figura 27. Aglomerados C (izq.) y F (der.) en reactivos químicos



### 3.3.5 Propiedades mecánicas

- **Dureza**

Para este ensayo se empleó un durómetro Shore D, con el objeto de evaluar la resistencia que oponían los aglomerados al ser penetrados por otro material más duro. Los resultados correspondientes se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Dureza de los aglomerados C y F

Muestra	Dureza Shore D
C	55
F	60

Para el caso, como el durómetro toma una escala desde 1 hasta 100 Shore D, es notorio que ambos aglomerados presentan dureza intermedia, sin presentarse notoria diferencia entre sí y siendo ambos valores importantes considerando que esta propiedad relaciona los materiales con el acabado superficial que han de tener al momento de ser sometidos al mecanizado, puesto que, la dureza de los materiales no debe ser ni muy alta porque existe la posibilidad de que se presenten despieces, ni muy baja porque el material puede deformarse (Álvarez, 2009).

- **Ensayo de compresión**

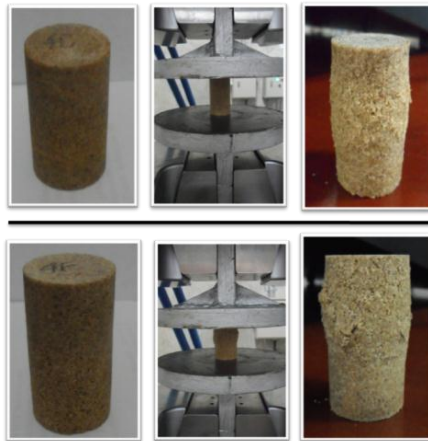
Los resultados correspondientes se encuentran en la tabla 12. En el anexo 2, se muestran las gráficas de deformación contra fuerza para los aglomerados C y F.

Tabla 12. Resultados de ensayo de compresión para los aglomerados C y F

Muestra	Área (m <sup>2</sup> )	Fuerza (kN)	Esfuerzo de Compresión E= F/A (MPa)	Deformación (mm)	Módulo de Elasticidad (MPa) $\sigma=E.\epsilon$
C	4,65E-03	18,57	3,99	5,30	0,40
F	4,83E-03	9,52	1,97	3,85	0,14

En la figura 28 se ilustra el ensayo de compresión sobre cada una de las muestras.

Figura 28. Ensayo de compresión. Arriba muestra C, abajo muestra F



Para hacer una comparación más clara sobre la fuerza máxima que resisten los aglomerados fabricados se recomienda revisar la figuras 29 y 30.

Figura 29. Comparación de resultados de compresión en términos de la fuerza

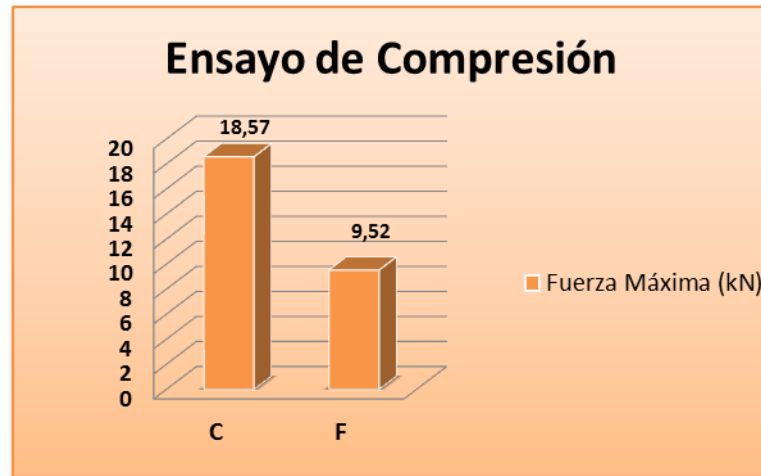
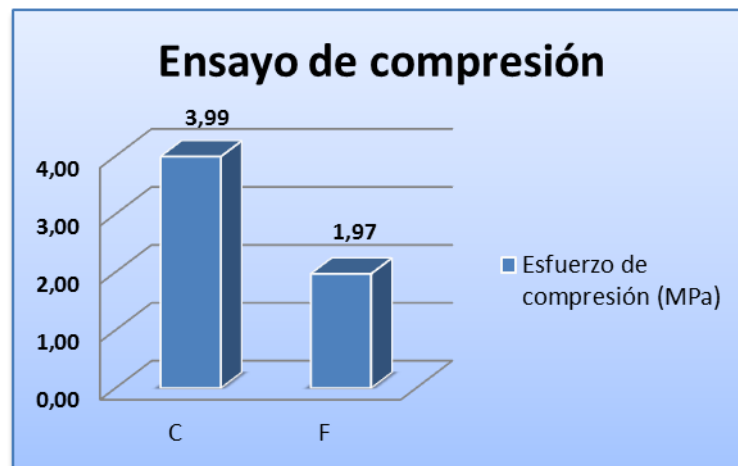


Figura 30. Comparación de resultados de compresión en términos del esfuerzo de compresión



La fuerza a compresión ejercida sobre las dos probetas ensayadas produjo que cada una tuviera su deformación adquiriendo una ligera forma de barril, ocurriendo lo que se denomina como una deformación plástica, puesto que al cese de la fuerza no hay retorno de la probeta a su forma inicial. Por lo que se puede notar, la fuerza máxima que resiste C es casi dos veces superior la que resiste F, esto realmente indica que pese a que el aglomerado F presenta una apariencia exterior similar a C, la tensión de compresión es muy diferente, en

consecuencia el esfuerzo (medida que ayuda a determinar la cantidad de fuerza que puede resistir un material antes de su fractura cuando se comprime) también mantiene una relación de 2 a 1 para C respecto a F.

Estas deformaciones que han sufrido los aglomerados son consecuencia del desplazamiento de unas moléculas respecto de otras en el sentido de la compresión (afuera hacia adentro) hasta disminuir su longitud (distancias de enlaces) quedando más apiñadas.

- **Ensayo de Impacto**

Con este ensayo se midió la energía absorbida por el material cuando es golpeado por un péndulo. Como se relaciona en la figura 31, la tenacidad de estos materiales es baja; sin embargo, la disminución de la energía de rotura va de la mano con un aumento de la rigidez (posibilidad de sufrir poca deformación elástica); para aplicaciones de tipo industrial se necesitan materiales con un comportamiento rígido, para el caso, C y F exhiben un buen comportamiento ante esta característica.

Figura 31. Energía de Impacto

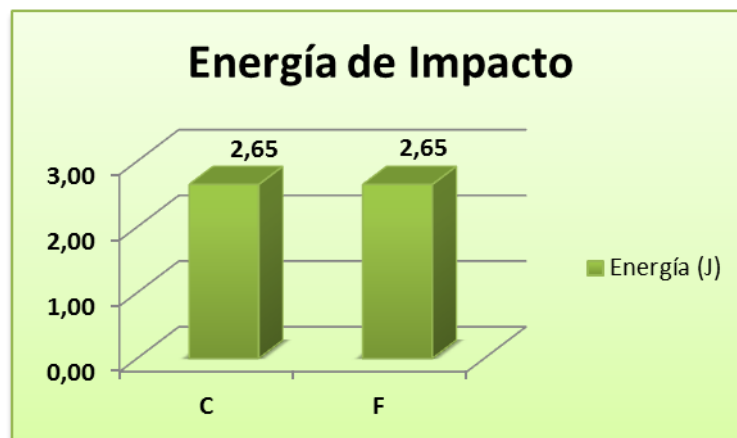


Figura 32. Probetas después del ensayo de impacto. Arriba muestra C, abajo muestra F



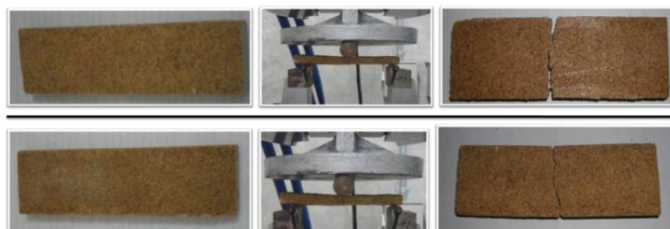
- **Ensayo de Flexión**

En la tabla 13 se relacionan los resultados producto de este ensayo y en el anexo 3, se pueden observar las curvas de deformación contra fuerza para este ensayo correspondientes a las muestras C y F.

Tabla 13. Resultados de resistencia a la flexión.

Muestra	l=Longitud entre los soportes (mm)	b=Ancho de la muestra (mm)	h=Espesor de la muestra	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la Flexión $\sigma=3Fl/2bh^2$ (MPa)
C	300	41,25	12,70	150	10,14
F	300	41,25	12,70	123,20	8,31

Figura 33. Muestras C y F durante el ensayo de flexión. Arriba muestra C, abajo muestra F

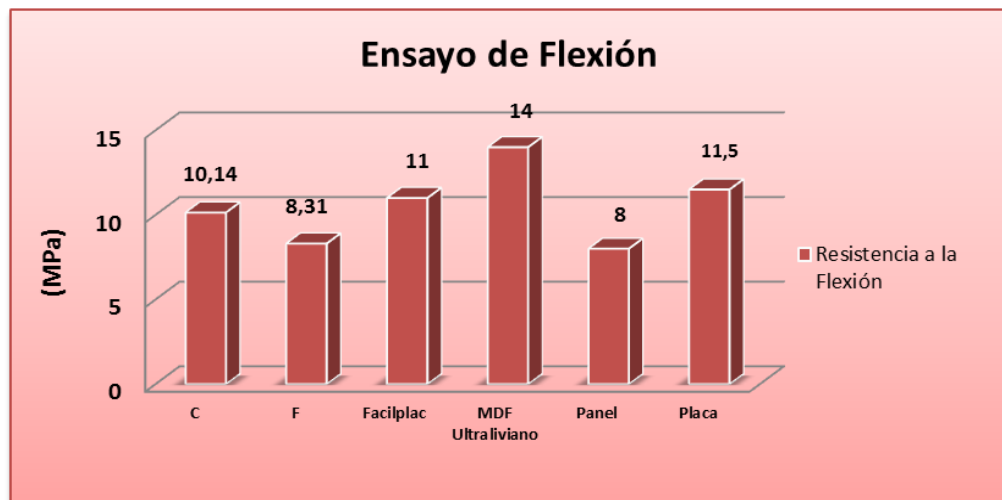


En la medida que se dificulte la rotación molecular disminuye la flexibilidad, por eso los entrecruzamientos y los sustituyentes voluminosos (grupos fenólicos)

de la estructura polimérica impiden que los aglomerados tengan mayor capacidad de flexión. Adicionalmente, en F se encuentran las cadenas poliméricas del material post-consumo que pueden aparecer como ramificaciones dispersas que influyen en la disminución de la resistencia a la flexión.

A manera de comparación, se pueden tener en cuenta otros materiales desarrollados por empresas productoras de tableros aglomerados; en este caso se hace un cotejo con algunos productos registrados de la empresa *Masisa*<sup>7</sup> (Facilplac, MDF ultraliviano, Panel y Placa) que caracteriza mecánicamente estos productos por la resistencia a la flexión (figura 34). Estos productos comerciales son tableros delgados o gruesos, de partículas de madera unidas entre sí mediante adhesivos uréicos, urea-formaldehído u otros; empleados en diversas aplicaciones, entre las que se encuentran: revestimientos de tabiques, muros, pisos o como parte integral de muebles, en zonas secas.

Figura 34. Comparación de resistencia a la flexión de varias muestras



<sup>7</sup> Información disponible en: [www.masisa.com](http://www.masisa.com)

Pese a que se observan productos con resistencias superiores, los aglomerados C y F igualan y superan a otros de estos productos; esto demuestra la utilidad de la cascarilla de arroz, la resina poliéster y el EPS post-consumo, para obtener productos materiales competitivos, similares a los productos mencionados o a los diferentes tipos de tableros de densidad media (MDF) existentes. Inclusive, se puede pensar que su fabricación a escalas mayores sería una opción acertada de cara a la obtención de aglomerados más amigables con el ambiente. Es de rescatar que los aglomerados aquí fabricados podrían tener potencial aplicación incluso en ambientes abiertos, en los que exista la posibilidad que se tengan zonas húmedas, dadas las características hidrófugas de las matrices poliméricas.

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

Se han fabricado materiales dúctiles, porque se deforman plásticamente antes de romperse; duros ya que se oponen a ser penetrados, hendidos o rayados, poco flexibles puesto que tienen poca posibilidad de sufrir deformaciones elásticas y materiales con la posibilidad de fallar por deformación o por ruptura dependiendo de las circunstancias a las que esté sometido.

#### 4. CONCLUSIONES

Se obtuvieron aglomerados de cascarilla de arroz con RPP y con la mezcla RPP/EPS-Es; con apariencia física exterior muy similar entre sí, livianos, resistentes a la humedad, perfectamente maquinables, con resistencia parcial a algunos agentes químicos y buen comportamiento térmico que permite considerarlos como útiles en aplicaciones diversas.

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

Utilizando material polimérico post-consumo, que tiene poco costo monetario y es de fácil adquisición, se consiguen elaborar productos de características similares a los que se fabrican con materiales poliméricos convencionales (aglomerados comerciales), estos factores le incrementan al material de desecho el valor agregado, se le retorna al ciclo de vida útil y se contribuye a la disminución de su acumulación en el medio.

El hecho de poder sustituir cerca de un 30% de la resina poliéster por un material post-consumo en la fabricación de aglomerados, puede reducir de manera significativa los costos de elaboración de estos nuevos materiales, para generarse entonces, productos con suficiente dureza, resistencia: a la compresibilidad, a la humedad, a las altas temperaturas y límite de flexibilidad, empleándose en gran parte sólo material de desecho.

La cascarilla de arroz tiene un gran potencial para convertirse en un material de carga de origen vegetal de un material compuesto. Constituyéndose esto en una nueva alternativa que amplía su campo de aplicación, le da valor adicional y se

establece como una posible solución frente al problema de su adecuada disposición; aprovechando que es un subproducto de bajo costo, baja densidad, resistencia aceptable, fácil obtención, biodegradable y proveniente de fuentes renovables.

Con la fabricación de C y F se obtienen productos con mejor resistencia térmica, resistencia a agentes químicos y densidad, frente a los que pueden ofrecer materiales más densos o más vulnerables al ataque químico como algunas especies madereras naturales.

## 5. RECOMENDACIONES

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

Producir los aglomerados y en la etapa final adicionar una capa de material polimérico pre acelerado, con el objeto de crearle a los materiales un recubrimiento exterior que los haga más resistentes al ataque de los reactivos químicos.

Fabricar y evaluar las propiedades de aglomerados elaborados solamente con EPS-Es para establecer la posibilidad de ahorrarse el empleo de la resina poliéster comercial, siempre que se generen materiales con buenas propiedades mecánicas.

## BIBLIOGRAFÍA

ARANDÉS, José. Reciclado de residuos plásticos. En: Revista iberoamericana de Polímeros, 2004. Vol. 5. no. 5, p. 28-45.

ÁLVAREZ, Jessica y MEJÍA Lina. Implementación de una formulación a partir de resinas poliéster, para la elaboración de prototipos maquinados en máquinas de control numérico computarizado. Trabajo de grado de Ingeniera de Producción. Medellín: Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería de Producción, 2009. 113 p.

ARDILA, Leydy y CASTAÑEDA, Mayerly. Implementación de un proceso que utilice el poliestireno post-consumo contenido en residuos sólidos, para obtener aglomerados a partir de emulsiones de poliestireno. Trabajo de grado Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ciencias. Escuela de Química, 2010. 92 p.

BUNSELL, A. Organic Matrices. En: Fundamentals of fibre reinforced composite materials. Taylor & Francis, 2005. p. 82-131.

CADENA, Carolina y BULA, Antonio. Estudio de la variación de la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales. En: Ingeniería & Desarrollo, 2002. Vol. 12, no. 8-9, p. 1-9.

FERNANDEZ, Luis. Reciclado químico de plásticos. En: Plásticos modernos, 2001. p. 245-255.

GENAUCK Bernhard. Iniciación a la Química de los Plásticos. Barcelona: Hanser, 1991.

GIL, Salvador. Introducción a la teoría de la elasticidad. Física 1. Universidad Nacional de San Martín, 2009. p. 11.

GONZÁLES, Lina y GONZÁLES, Claudia. Aprovechamiento y reutilización de ABS post-consumo en la fabricación de aglomerados usando como carga cascarilla de arroz. Trabajo de grado Ingeniera Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2010. 110 p.

GONZÁLES, J. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción. Tesis de grado Doctor en Proyectos de Innovación Tecnológica en la Ingeniería del Producto y Proceso. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Escuela Técnica superior de Ingenieros Industriales de Barcelona. Departamento de Proyectos de Ingeniería, 2005. 370 p.

KLYOSOV, Anatole. Wood-Plastic Composites. United States of America: Wiley-Interscience, 2007. 698 p.

MANAS, Chanda and SALIL, Roy. Industrial Polymers. En: Plastics Technology Handbook. 4 Ed. Taylor & Francis, 2006.

MONTOYA, Diana y ZAPATA, María. Fabricación de un material compuesto a base de semillas de aguacate y resinas termofijas. Trabajo de Grado de Ingeniero de Procesos. Medellín: Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería de Procesos, 2005. 139 p.

OWEN, J. Reutilización de Acrilonitrilo Butil Estireno (ABS) post-consumo. Trabajo de grado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2010. 110 p.

PACHON, Durlay y URIBE, Zaida. Utilización de poliestireno espumado post-consumo como aditivo en pinturas tipo laca piroxilina. Trabajo de grado de Ingeniera Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2008. 86 p.

PLASTIVIDA. Position Paper Gestión de los plásticos al final de su vida útil. En: Boletín Informativo N° 26, 2009. p. 5.

PLASTIVIDA. Plásticos: su origen y su relación con el medio ambiente. En: Boletín Informativo N° 3, 2007. p. 8.

RAMIS, Xavier. Estudio de la eficiencia de sistemas químicos de iniciación del curado de resinas de poliéster insaturado. Trabajo de grado Doctor en Ciencias Químicas. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Escuela Técnica superior de ingenieros industriales de Barcelona, 1993. 338 p.

ROA, Manuel. Depolimerización de residuos de Polimetilmetacrilato (PMMA) de la industria dental. Trabajo de grado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ciencias. Escuela de Química, 2008. 82 p.

SEYMOUR, Raimond. Química de los Polímeros. Hattiesburg: Reverté, 1995. p. 293-297.

SORENSEN, Wayne. Preparative methods of polymer chemistry. Londres: Interscience publishers, 1961. p. 17-35.

TRIANA, Max y GONZÁLES, Roso. Estudio de las propiedades mecánicas de la madera de palosangre (brosimun rubescenstaub.), procedencia: Leticia, Amazonas. En: Revista Colombia Forestal, 2008. Vol. 11 p.149-164.

VILADOMS, Juan. Análisis de las propiedades de los materiales compuestos sometidos a tensión o flexión. Trabajo de grado Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Puebla, Cholula: Universidad de las Américas Puebla. Escuela de Ingeniería Mecánica. Departamento de ingeniería Mecánica, 2003.

WECHSLER, Andrea and HIZIROGLU, Salim. Some properties of wood-plastic composites. En: Building and Environment, 2007. Vol. 47 p. 2637-2644.

## **ANEXO 1. NORMAS TÉCNICAS**

### **ENSAYO A COMPRESIÓN**

#### **NORMA D-695**

#### **SIGNIFICADO Y USO**

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

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

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

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

## **ÁMBITO**

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

## **PROCEDIMIENTO**

Las probetas que se emplean en el ensayo estándar pueden ser sometidas hasta una carga de 41.379 MPa. Los valores indicados se dan en unidades del Sistema Internacional, las dimensiones de las probetas a fallar deben ser sometidas a las especificaciones del equipo a utilizar para esta prueba, la geometría de cada una de las muestras es cilíndrica.

## **ENSAYO DE IMPACTO**

### **NORMA D-256**

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

## **SIGNIFICADO Y USO**

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

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

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

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

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

## **ESPECIFICACIONES DE LAS MUESTRAS**

Las muestras tendrán una anchura entre 3.0 y 12.7 mm. Siendo la abertura de la muesca de aproximadamente de 0.05 mm, la longitud  $\pm$  12.7 mm, siendo la longitud de la muesca y uno de los lados extremos de 31.8 mm y un espesor de 10.6 mm. La forma de estas muestras a fallar es paralelepípeda. Estos factores dependen de la maquina a emplear y de sus especificaciones, por lo que pueden variar.

## **CONDICIONAMIENTO**

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

## **PROCEDIMIENTO**

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

La prueba comienza cuando el péndulo inicia su movimiento desde una altura inicial describiendo un arco y posteriormente golpea y rompe la probeta llegando a una altura final. La prueba debe ser realizada con una velocidad constante para cada una de las muestras a fallar. Es importante tener en cuenta que al usar un péndulo muy pesado esto reducirá la sensibilidad de la lectura del ensayo.

## **ENSAYO DE FLEXION**

### **NORMA D-790**

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

El método para esta prueba es aplicable generalmente a materiales rígidos y semirrígidos. Sin embargo la fuerza a flexión no se puede determinar para materiales que no se rompan o que no fallen en la superficie externa del espécimen dentro del 5% del límite de la tensión.

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

### **RESUMEN DE LA PRUEBA**

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

## **SIGNIFICANCIA Y USO**

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

## **CONDICIONAMIENTO**

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

## **PROCEDIMIENTO**

Medir la anchura y profundidad del espécimen a fallar, estas medidas son importantes ya que permiten realizar cálculos matemáticos que conducirán a la medida de la resistencia a la flexión.

Alinear la carga justo en la mitad de los apoyos, los apoyos deben estar paralelos entre sí, lo cual se puede comprobar mediante una placa con surcos paralelos en la cual los apoyos estarán alineados si están en una posición correcta.

Centrar la muestra en los apoyos y en la carga.

Aplicar la carga especificada hasta romper la superficie exterior de la muestra o antes de alcanzar la tensión máxima, tomando datos simultáneos de la desviación de la carga.

## CÁLCULO

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

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

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

$\sigma_f$ : Tensión en las fibras externas en el punto medio, MPa

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

l: Distancia entre los soportes, mm

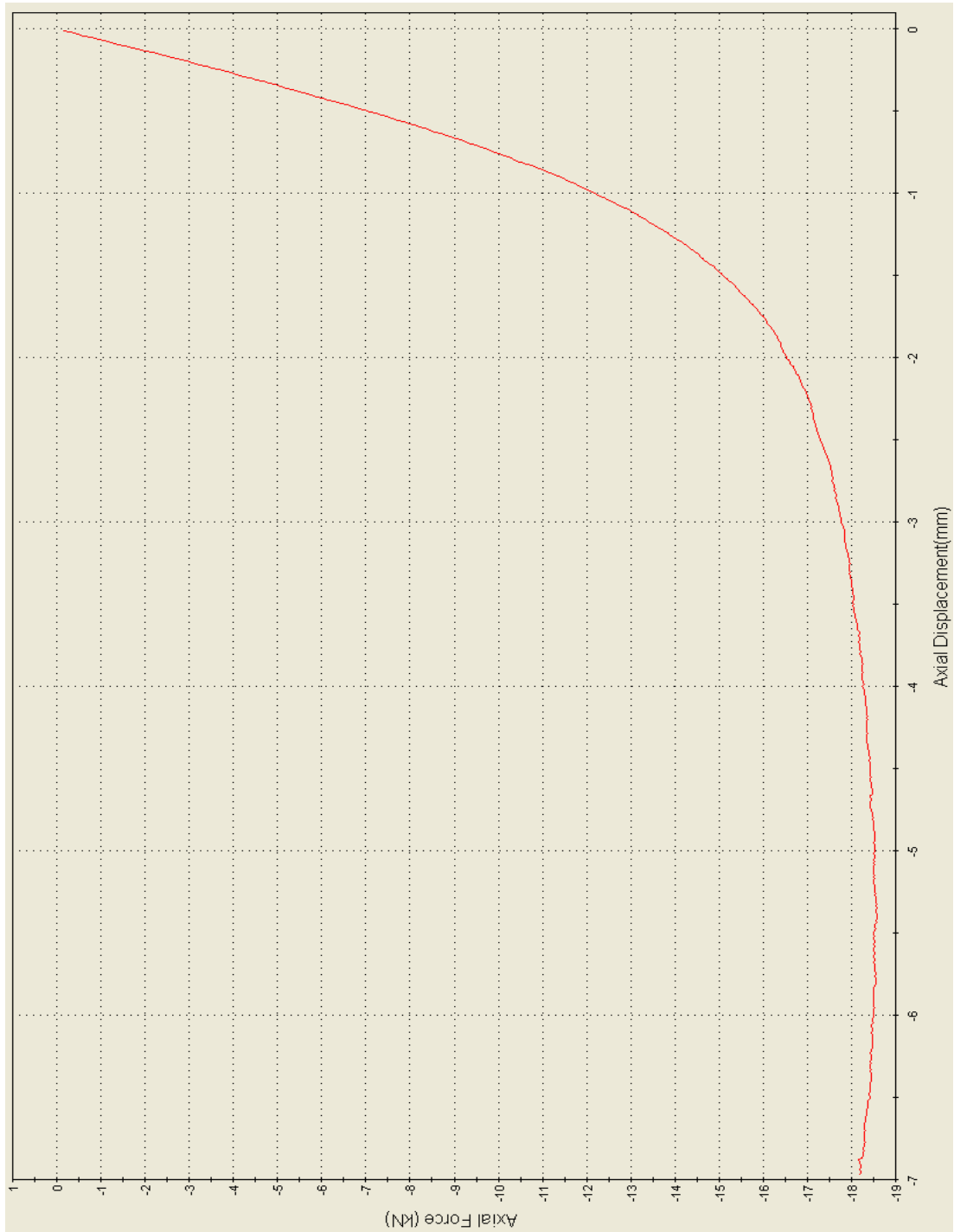
b: Ancho de la muestra, mm

d: Profundidad de la muestra, mm

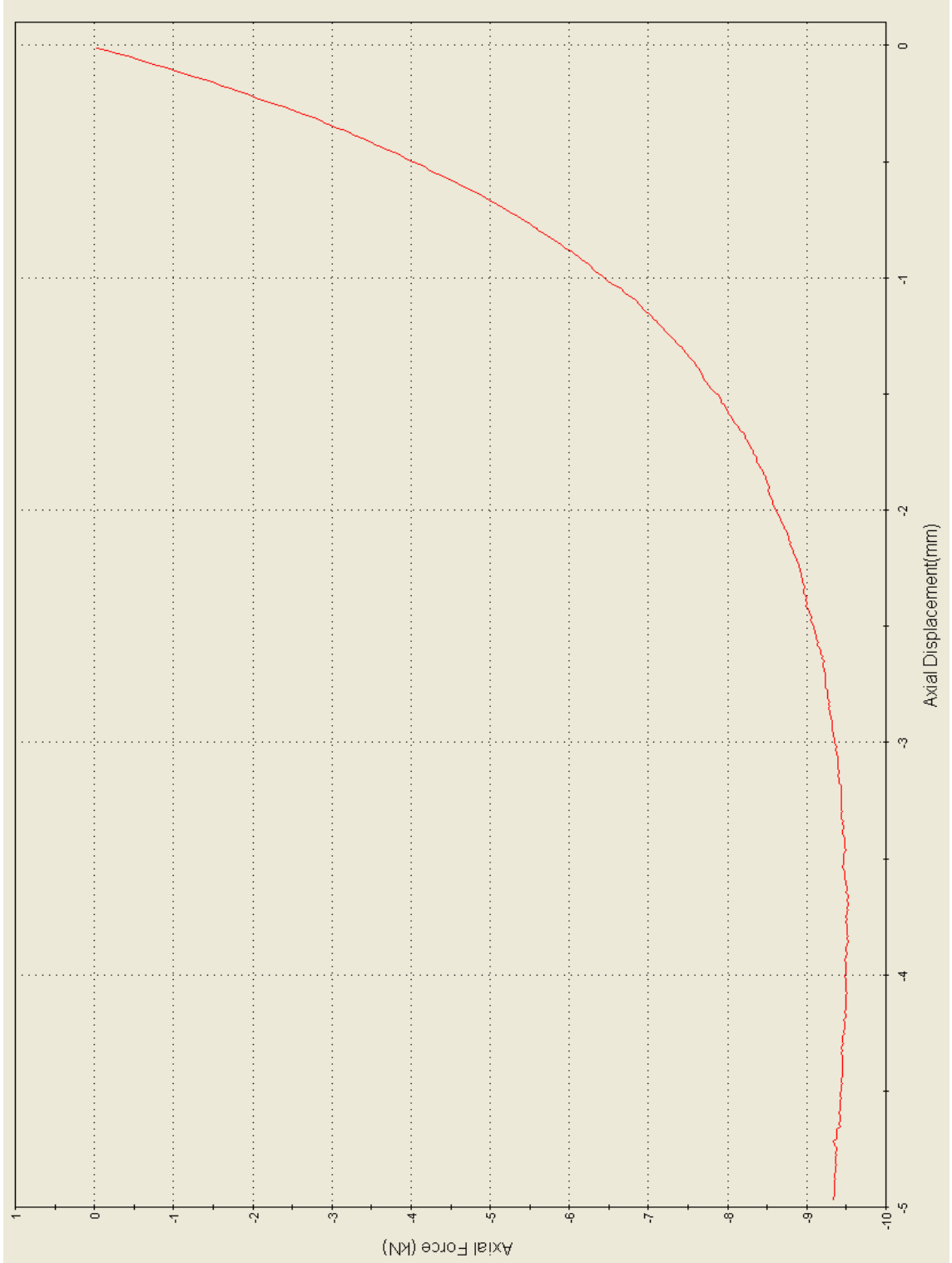
Se aplica para los materiales en los cuales la tensión es lineal proporcional a la tensión hasta el punto de ruptura. La ecuación es válida para obtener datos de comparación.

## ANEXO 2. ENSAYO DE COMPRESIÓN GRÁFICAS DE DEFORMACIÓN CONTRA FUERZA

- MUESTRA C

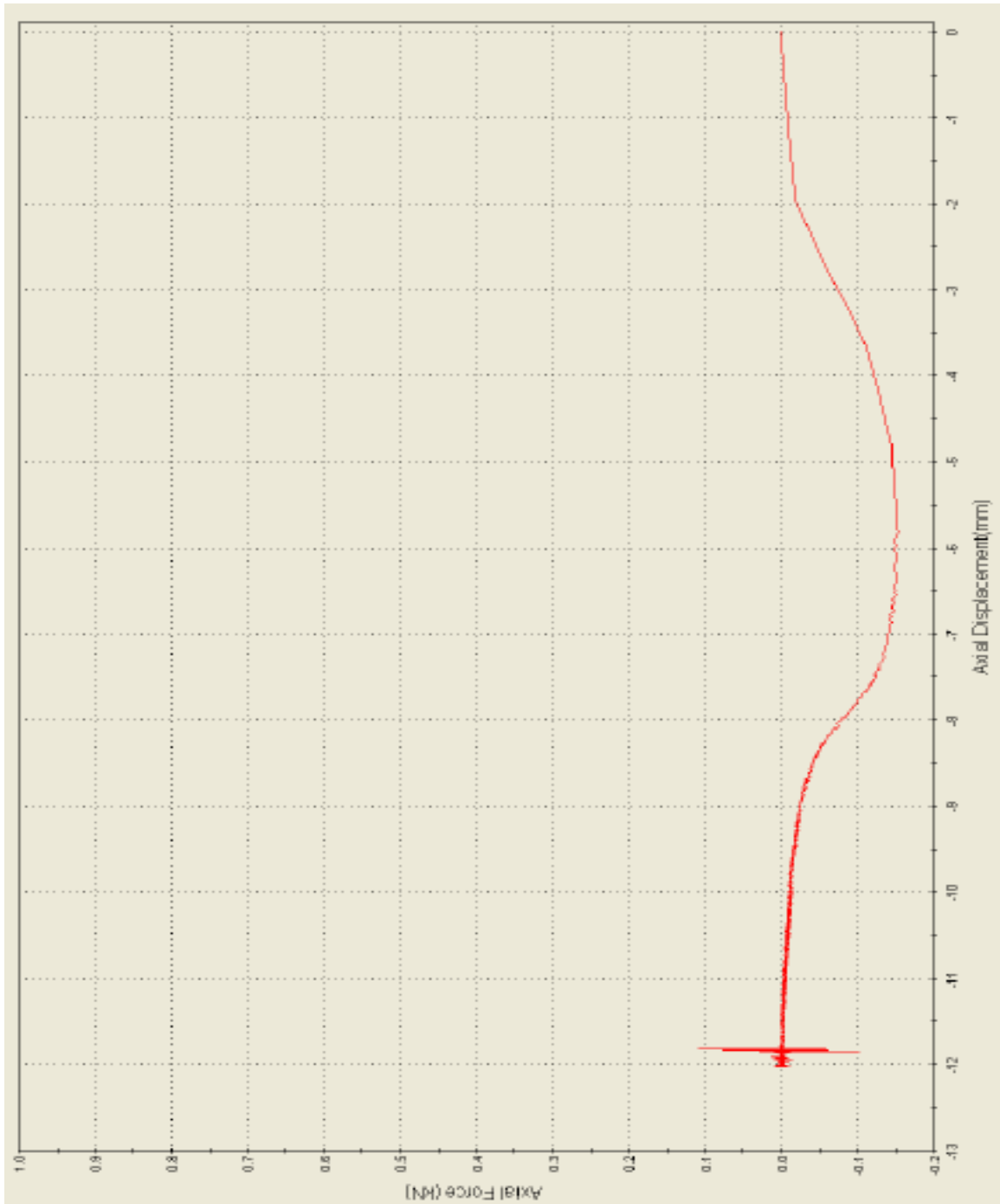


- MUESTRA F

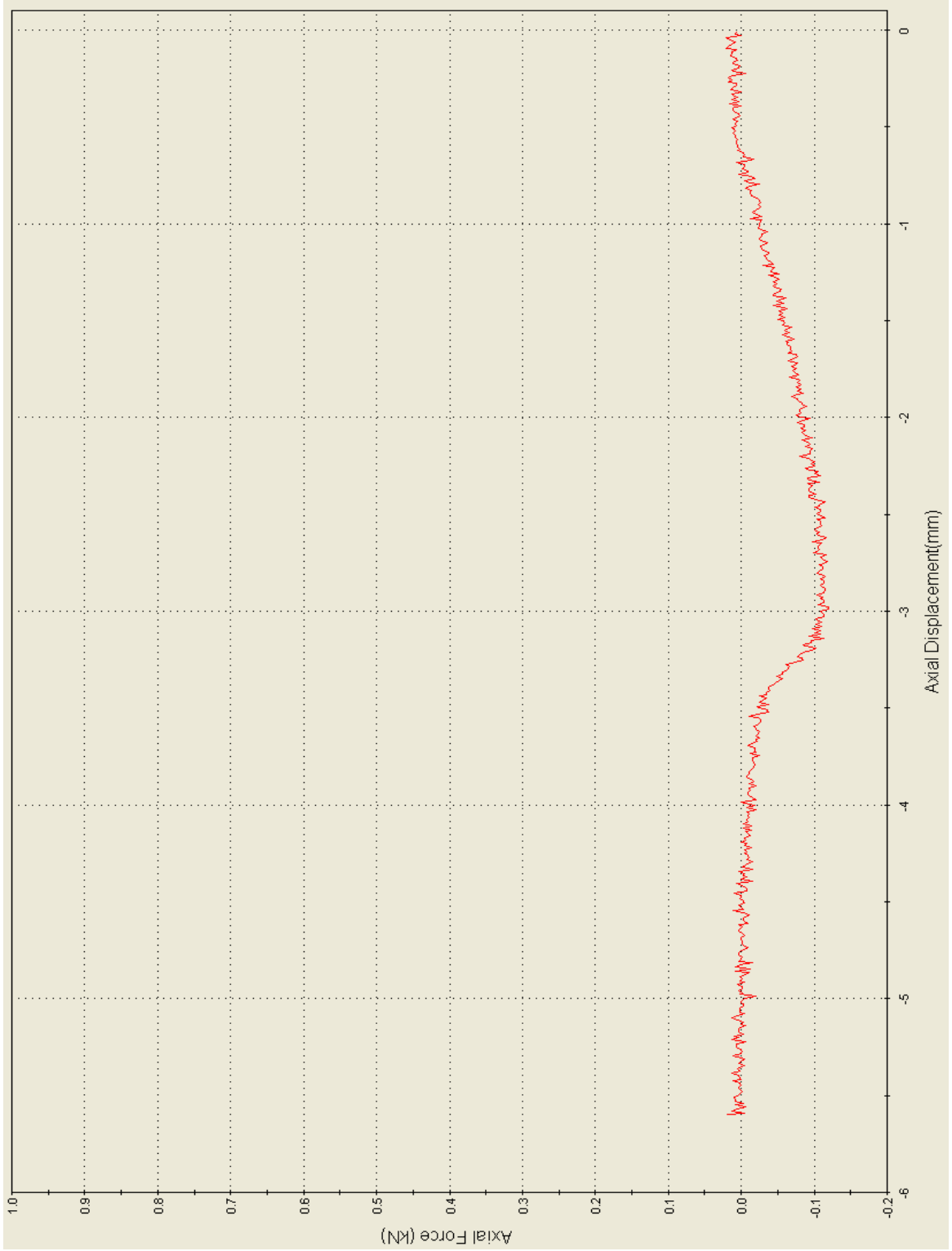


### ANEXO 3. ENSAYO DE FLEXIÓN GRÁFICAS DE DEFORMACIÓN CONTRA FUERZA

- MUESTRA C



- MUESTRA F



## ANEXO 4. FICHA DE SEGURIDAD DEL ESTIRENO

### PROPIEDADES FÍSICAS

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

**Punto de ebullición:** 145 °C

**Punto de fusión:** -30.6 °C

**Densidad relativa (agua = 1):** 0.9

**Solubilidad en agua** 0.03 g/ml a25°C

**Presión de vapor (Pa)**

**a 10°C:** 312

**a 20°C:** 600

**a 30°C:** 1095

**a 40°C:** 1906

**Densidad relativa de vapor (aire = 1)** 3.6

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

### VÍAS DE PENETRACIÓN

#### ***Respiratoria:***

La exposición humana a estireno se produce principalmente por inhalación.

#### ***Oral:***

Por ingestión accidental de estireno líquido.

### **Cutánea:**

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

## **DISTRIBUCIÓN Y ALMACENAMIENTO EN EL ORGANISMO**

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

## **EFFECTOS SOBRE LA SALUD**

### **Intoxicación aguda**

#### **A) La ingestión accidental de estireno produce.**

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

#### **B) Por inhalación**

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

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

### **OTROS EFECTOS DE TIPO AGUDO TIENEN LUGAR EN:**

- La piel: El contacto de la piel con el estireno líquido da lugar a dermatosis de irritación (piel seca y escamosa), como consecuencia de su acción desengrasante y desecante. En animales de experimentación se ha visto que la irritación cutánea puede ser lo suficientemente intensa como para causar ampollas y necrosis tisulares.
- Los ojos: Irritación de la conjuntiva ocular con enrojecimiento e hipersecreción lacrimal (conjuntivitis), que desaparece al cabo de dos o tres días sin dejar secuelas.

### **INTOXICACIÓN CRÓNICA**

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

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