

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



**CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS A BASE DE POLIMEROS-  
FIBRA DE BAGAZO DE NOPAL POR INYECCIÓN**

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO MECANICO  
PRESENTA:

**JOSE SALINAS GARCIA**

**DIRECTOR DE TESIS: DRA. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN**

MEXICO D.F. A 25 DE ENERO DEL 2011

## **Agradecimientos:**

A Jehová Dios.

Por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarte cada día más.

A mi Familia.

Mis padres José y Martha por haberme educado y soportado mis errores. Gracias a sus consejos y por el amor que siempre me han brindado, por cultivar e inculcar ese sabio don de la responsabilidad, el apoyo que me brindaron para culminar mi carrera profesional.

Gracias a mi esposa Mónica que me apoyo en todo momento y la paciencia que tuvo para conmigo, a mis princesas Daphne y Melanie que me motivaron para culminar este proyecto.

A mis Hermanos David, Marcos, Elizabeth y Martita porque siempre he contado con ellos para todo, gracias a la confianza que siempre nos hemos tenido; por el apoyo y amistad.

A mis maestros.

Gracias por su tiempo, por su apoyo así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional, en especial: a la Dra. Magdalena Trujillo Barragán por haber guiado el desarrollo de este trabajo y llegar a la culminación del mismo, por su valiosísimo apoyo, por su paciencia e interés y sobre todo su incomparable amistad. Al Dr. Omar A. Jiménez Arévalo el cual nos proporciono el material para la elaboración de las probetas de ensayo y sus consejos invaluable para este proyecto. Al Dr. Alfredo Maciel por el apoyo brindado para utilizar las instalaciones de Instituto de Investigación de Materiales.

A mis amigos

Que gracias al equipo que formamos logramos llegar hasta el final del camino y que hasta el momento, seguimos siendo amigos: Cesar Sosa, Pedro Piña, Jesús Martínez, entre demás amigos que saben quiénes son y que no me alcanzaran los renglones para mencionar a todos gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería que me dieron la oportunidad de formar parte de ellas y formarme como profesionista.

**¡Gracias!**

***CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS A BASE DE POLIMEROS-  
FIBRA DE BAGAZO DE NOPAL POR INYECCIÓN***

<b>ÍNDICE TEMÁTICO</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	
<b>ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO</b>	
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b>	
<b>CAPITULO 1 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN AL COMPUESTO</b>	<b>8</b>
1.1 Compuestos Reforzados con Fibras	
1.1.1 Fibras cortas y largas	
1.1.1.1 Importancia de la interfase	
1.1.1.2 Relación con la matriz	
1.2 Características de los refuerzos fibrados	
1.2.1 Fibra de carbono	
1.2.2 Fibra de vidrio	
1.2.3 Fibras naturales	
1.3 Fibras de Origen Vegetal	
1.3.1 Compuestos de Rastrojo de Piña	
1.3.2 Plásticos Reforzados con Madera	
1.3.3 Polipropileno reforzado con sisal	
1.4 Los Plásticos	
1.4.1 Características de los termoplásticos	
1.4.2 EL Polipropileno	
1.4.3 El Polietileno	
1.4.4 El poliestireno	
<b>Capitulo 2 REFUERZOS NATURALES Y PROCESOS DE INYECCION</b>	<b>27</b>
2.1 Refuerzos Naturales Fibras de bagazo de piña, caña y madera	
2.2 El Proceso de Inyección	
2.2.1 Comparación de parámetros de inyección con materiales sin fibra y con fibras convencionales.	
2.2.2 Problemas en Pieza Procesadas por Inyección.	
2.3 Preparación de fibras de nopal	

## **Capítulo 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL**

**40**

- 3.1 Descripción General del Proceso de trabajo
  - 3.1.1 Determinación de las Características de las Fases del Compuesto
    - 3.1.1.1 Condiciones de Trabajo para el Bagazo de Nopal
    - 3.1.1.2 Condiciones de Trabajo para Polipropileno, polietileno y poliestireno
    - 3.1.1.3 Parámetros de inyección utilizados, características y dificultades
  - 3.2 Determinación de las cantidades de material a utilizar.
- 3.3 Ensayos mecánicos
  - 3.3.1 Prueba de Tracción
  - 3.3.2 Ensayo de Dureza
  - 3.3.3 Ensayo de Flexión
  - 3.3.4 Microscopia Electrónica

## **Capítulo 4 RESULTADOS Y ANALISIS**

**51**

- 4.1 Procesamiento de las Muestras
- 4.2 Características físicas de las Piezas
- 4.3 Análisis de la Prueba de Tracción
- 4.4 Resultados y análisis del Ensayo de Dureza
- 4.5 Resultados de la Prueba de Flexión
- 4.6 Microscopia electrónica.

### **CONCLUSIONES**

### **APORTACIONES FUTURAS**

### **ANEXOS**

### **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## INTRODUCCION

En la vida moderna el plástico ha constituido un fenómeno de indudable trascendencia. Hoy en día el hombre vive rodeado de objetos plásticos que en siglos anteriores no eran necesarios para la vida cotidiana. Los plásticos se han fabricado para satisfacer las demandas de una gran variedad de usos, debido al papel determinante que ha desempeñado este material en su desarrollo en el mejoramiento de las condiciones de la vida del hombre y el acelerado crecimiento de la ciencia y la tecnología.

Lo anterior ha llevado a ver y analizar que tan viable resultaría hacer una combinación de materiales orgánicos con inorgánicos, como es el caso de las fibras naturales (residuos maderables, plantas, etc) con vidrios, metales, plásticos, para producir nuevos compuestos, los que tienen la finalidad de mejorar las propiedades de estos últimos, que sean mas baratos y que exista una verdadera unión entre los elementos que conforman al nuevo compuesto.

Hoy en día las investigaciones se inclinan por el estudio de las características de los materiales compuestos conformados por fibras naturales los cuales en su mayoría se queman por ser utilizados como combustibles o bien como alimento para ganado, o simplemente son desechadas como basura o para composta, sin mucho beneficio; en combinación con termoplásticos, que son materiales altamente funcionales, de fácil producción y de costos bajos.

El hecho de que estos nuevos polímeros reforzados (como hoy en día se les nombra) sean altamente funcionales es de gran valor, ya que con ésto no sólo se tiene la certeza de que el material es capaz de competir con cualquier material comercial conocido, sino que debido a que se conforman por fibras orgánicas generan una reducción de costos en los procesos de producción.

Es importante mencionar que el interés por estudiar estos materiales surge de la búsqueda para generar fuentes alternas de explotación de recursos naturales, ya que, como es conocido, la sobre explotación de los bosques, lagos, acuíferos y demás zonas naturales, ha llevado a que el planeta sufra grandes cambios, los cuales incrementan los niveles de contaminación y que se ven reflejados en las transformaciones abruptas que sufre el clima; es por ello que el uso de residuos orgánicos generados por las cosechas en distintas regiones del país, puede resultar económicamente más benéfico que continuar con la destrucción incontrolada del medio ambiente que existe hoy en día.

Por ello es que este trabajo pretende demostrar que usar fibras orgánicas producto de la recolección y procesamiento del nopal puede dejar de ser desperdicio y convertirse en un refuerzo que al ser acoplado a un polímero nos dé un producto con propiedades mecánicas diferentes a las que por sí solos no tendrían.

En este trabajo se presentan las características que constituyen al material compuesto, seguido de una descripción de su proceso de inyección (conformado de plásticos), para después someterlo a pruebas de tracción, se describe el método de la obtención de las fibras naturales y el polímero, y la fase de optimización experimental basada en la unión entre las fibras y la matriz polimérica.

Se comentará sobre todos los elementos que constituyen a los materiales en estudio, propiedades tanto físicas como mecánicas y de la misma forma se presentaran las teorías de compuestos reforzados así como ejemplos de algunos usos con fibras naturales y antecedentes de materiales compuestos llevados a la industria automotriz.

### **Antecedentes**

Los materiales constituidos con fibras naturales se han elaborado en Estados Unidos desde hace décadas y han tenido un auge importante en los últimos años debido a la necesidad de buscar recursos naturales de desecho que sirvan como refuerzos aprovechando esa condición. Normalmente se ha buscado que la matriz sea degradable para constituir un compuesto como tal; sin embargo, para los estudios previos al comportamiento tanto de la matriz como de la fibra, es necesario recurrir a materiales de propiedades conocidas ya que la consideración de utilizar un polímero al que se le incorpora una fibra natural ofrece ventajas importantes dado que las propiedades de la matriz ya son conocidas, sobre todo en sus propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la tracción y rigidez (en ciertos casos); sin embargo, el utilizar fibras naturales tiene desventajas que deben de ser consideradas, tales como su gran capacidad de absorber y retener humedad, baja estabilidad térmica y una calidad inestable. Por otro lado, estas fibras tienen un comportamiento muy parecido a las fibras sintéticas debido a la distribución que presentan de acuerdo al proceso de manufactura, la cual generalmente debe ser uniforme (no debe presentar empaquetamientos) en todas direcciones y esto permite que pueden mejorar las propiedades del material.

Por ser consideradas como residuos orgánicos, las fibras naturales suelen ser mas baratas que algunos refuerzos inorgánicos como la fibra de vidrio, las fibras de Kevlar (con propiedades mecánicas menores) o de Carbono (propiedades mecánicas altas), y debido a ello suelen ser mas atractivas para someterlas a algún procesamiento industrial, aunque sus propiedades sean inferiores a estos tres últimos.

## Aspectos generales del proyecto

En este trabajo se prepara un material compuesto basado en un refuerzo de fibras naturales de nopal embebidas en una matriz polimérica, en particular de combina con PP (polipropileno), PH (polietileno) y PS (poliestireno). Se realiza una caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales poliméricos reforzados y se desarrollan las condiciones del proceso de fabricación evaluando principalmente las propiedades mecánicas del material.

Para poder caracterizar al compuesto se recurre al proceso de inyección de plásticos y se desarrollan pruebas de acuerdo a las normas ASTM (American Society Testing of Materials), además se hace una inspección del producto terminado para observar el flujo del material, dirección de la fibra y su distribución. Por medio de microscopía electrónica, se observa la relación entre la matriz y la fibra. La matriz es comparada entre plásticos de uso común y de fácil procesamiento como el polietileno, el polipropileno y el poliestireno.

Dentro de los parámetros de diseño del material compuesto están:

- 1.- La observación de la buena adhesión entre la matriz polimérica y el refuerzo de fibras naturales, lo cual depende en primera instancia de que la fibra contenga la menor cantidad posible de humedad.
- 2.- Obtener o desarrollar un compuesto que supere a las propiedades mecánicas individuales de cada material en estudio.

Debido al proceso de conformado que se utilizara para la obtención del compuesto es importante tener presente los criterios de diseño. Las condiciones o las variables controladas para el proceso de inyección homogénea del material compuesto son:

1. Homogeneidad de la distribución de fibras, esto es que si las fibras quedan separadas y no se distribuyen de forma uniforme, pueden generar cambios en las propiedades mecánicas del compuesto.
2. Tamaño de la fibra, el tamaño de la fibra debe ser pequeño y uniforme para lograr una mejor adherencia entre ésta y la matriz polimérica.
3. Humedad, tener presente que la fibra debe de estar libre de humedad, para evitar porosidades y vacuolas.
4. Temperatura de proceso contra temperatura de combustión, hay que tomar en cuenta que durante los diferentes procesos la fibra puede ser sometida a temperaturas muy elevadas lo que puede provocar que se calcinen y generar que el compuesto tenga un aspecto no adecuado.

## **Objetivo general**

Desarrollar un material compuesto que contenga como matriz un polímero de uso común y evaluar el efecto de la introducción de un refuerzo proveniente de la fibra de nopal, para así poder encontrar un aprovechamiento de los desperdicios naturales que se tienen al producir el nopal.

A su vez realizar el estudio mecánico para conocer las propiedades con las que cuenta el nuevo material y darle un uso adecuado en el área de diseño.

## **Objetivos particulares**

Lograr la elaboración de un material que sea reciclable, funcional y flexible, para dar un buen uso a los residuos orgánicos que resultan del proceso de limpieza del nopal y del procesamiento para diferentes presentaciones del mismo.

Elaborar mediante diferentes condiciones de procesamiento y pruebas mecánicas una caracterización del material compuesto y con ello determinar de qué forma se presentan las mejores cualidades del material para su posible aplicación.

Desarrollar un material compuesto con la posibilidad de sustituir en algunos casos a materiales que en el presente rigen en la industria del plástico, así mismo desarrollar el estudio mecánico del material para una mejor implementación en el área de diseño y poder así explotarlo al máximo.



## **Capítulo 1 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN AL COMPUESTO**

Los plásticos reforzados con fibras dan una alternativa para aplicaciones específicas, sobre todo cuando se trata de aplicaciones estructurales ya que un compuesto formado por dos o más materiales lo hacen posible; en el caso de fibras naturales, estas pueden aprovechar su disponibilidad inmediata y hasta cierto punto a bajos costos. Si recordamos que están constituidos por un refuerzo: parte en forma de partícula o fibra discontinua, ya sea corta o larga, una matriz: ésta funciona como aglutinante del nuevo compuesto y permite una buena distribución de esfuerzos, y una interface: que es la zona de unión entre el refuerzo y la matriz; se puede ver que existen muchas alternativas para crear un buen compuesto.

Es por ello que se desea la existencia de una mejora en sus características cuando se logra una buena unión entre la matriz y el refuerzo, sin embargo cuando ésta adhesión no existe, se pueden presentar problemas como absorción de agua u otros que puedan generar una baja en las propiedades del material.

Para la elaboración de estos materiales es importante tomar en cuenta las características básicas de cada uno de los elementos que conforman al nuevo compuesto, para que una vez desarrollado, éste presente las condiciones óptimas para ser sometido a cualquier condición.

### **1.1 Compuestos Reforzados con Fibras**

Éste es el tipo de compuesto que más nos interesa debido a que el material obtenido en este trabajo es un compuesto reforzado con fibras. Éste tipo de materiales se pueden considerar como los más importantes debido la presencia de fases dispersas y se fabrican con la finalidad de conseguir una mejor resistencia mecánica, para soportar la mayor parte de la fuerza aplicada, la resistencia del compuesto incluso puede resultar alta a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas.

Para fabricarlos son empleados mucho tipos de refuerzos. Por siglos se ha utilizado la paja para reforzar los ladrillos de barro o adobes; en las estructuras de concreto se introducen varillas de acero como refuerzos; las fibras de vidrio en una matriz polimérica producen un material para aplicaciones en la transportación y la industria aeroespacial, las fibras de boro y carbono aportan un refuerzo excepcional en compuestos avanzados basados en matrices de polímeros, metal o cerámica. Las propiedades mecánicas que adquieren estos compuestos dependen en gran medida de las características geométricas de la fibra tales como su longitud y diámetro, pero además, es importante considerar el grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por

medio de las fases de la matriz: las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas, a menudo se caracterizan sus dimensiones mediante la relación de aspecto  $\ell/d$ , donde  $\ell$  es la longitud de las fibras y  $d$  su diámetro. "Una fibra típica tiene diámetros que varían desde 10  $\mu\text{m}$  hasta 150  $\mu\text{m}$  y la resistencia del compuesto tiende a mejorar cuando su relación es grande".

Las fibras de refuerzo se introducen en la matriz con orientaciones diversas, generalmente de forma aleatoria dando un comportamiento isotrópico; cuando hay arreglos unidireccionales las fibras son largas e incluso continuas y producen propiedades anisotrópicas, con resistencia y rigidez paralelas a las fibras.

Existen muchas aplicaciones para este tipo de materiales que se han hecho, principalmente en América Latina, dentro de las que se encuentran:

- Polietileno y Polipropileno recuperados de desechos municipales reforzados con fibras de madera.
- Polímeros biodegradables con fibras de algas mediante calandrado.
- Poliéster biodegradable con fibras cortas de Albahaca con y sin tratamiento, presentando mejoras en los compuestos con las fibras tratadas.
- Compuestos poliméricos con fibras de palma
- Compuestos de fibra sisal y matriz polipropileno.
- Compuestos de PVC y SAN con fibras de henequén.
- Compuestos de henequen y polietileno de alta densidad (HDPE).
- Materiales compuestos a base de polipropileno con fibras de aserrín de eucalipto.
- Poliéster con refuerzo de cascarilla de arroz.
- Materiales compuestos a base de celulosa y ácidos poli-carboxílicos para la elaboración de membranas inteligentes que sean capaces de variar su tamaño de poro dependiendo las condiciones de temperatura y presión a las que sean sometidas.

En el próximo capítulo nos enfocaremos al estudio de fibras naturales y de los procesos de conformado de los materiales compuestos con este tipo de refuerzos.

### 1.1.1 Fibras cortas y largas

Las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas. A menudo se caracterizan sus dimensiones mediante la relación forma  $l/d$ , donde  $l$  es la longitud de las fibras y  $d$  su diámetro. Las fibras típicas tienen diámetros que varían desde 10 micrones ( $10 \times 10^{-4}$  cm) hasta 100 micrones ( $150 \times 10^{-4}$  cm).

La resistencia del compuesto mejora cuando la relación de forma es grande. A menudo las fibras se fracturan debido a defectos de superficie. Fabricarlas con un diámetro lo más pequeño posible, le da a la fibra menos área superficial; en consecuencia, hay menos defectos que puedan propagarse durante el proceso o baja carga. También se prefieren fibras largas. Los extremos de una fibra soportan menos carga que el resto; por tanto a menos extremos, mayor capacidad de las fibras para soportar carga.

En muchos sistemas reforzados, se utilizan fibras discontinuas con una relación de forma por encima de algún valor crítico, a fin de conseguir un término medio aceptable entre la facilidad de procesamiento y sus propiedades. Para cualquier diámetro dado de fibra  $d$ , se puede determinar una longitud crítica de fibra  $l_c$ ,

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2 \tau_i}$$

Donde  $\sigma_f$  es la resistencia de la fibra y  $\tau_i$  está relacionado con la resistencia de la unión entre la fibra y matriz o al esfuerzo al que la matriz se empieza a deformar. Si la longitud  $l$  de la fibra es menor que  $l_c$ , se observa poco efecto reforzante, si  $l$  es mayor que aproximadamente  $15 l_c$ , la fibra se comporta casi como si fuera continua. La resistencia del compuesto se puede estimar a partir de

$$\sigma_c = f_f \sigma_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + f_m \sigma_m$$

Donde  $\sigma_m$  es el esfuerzo en la matriz al romperse las fibras.

### **1.1.1.1 Importancia de la interfase (anclaje)**

Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz, para que la carga se transfiera correctamente de la matriz a las fibras. Si la unión es pobre, las fibras pueden salir de la matriz durante la carga, reduciendo la resistencia y la resistencia a la fractura del compuesto. En algunos casos, para reforzar la unión se pueden utilizar aditivos y recubrimientos especiales. Las fibras de vidrio se pueden recubrir con silano, un agente orgánico (conocido como recubierta) para mejorar la unión y la resistencia a la humedad en compuestos de fibra de vidrio. Similarmente, las fibras de carbono se recubren con un material orgánico para mejorar la unión. Se han recubierto fibras de boro con carburo de silicio o nitruro de boro para mejorar la unión con la matriz de aluminio; de hecho, a estas fibras se les llama fibras Borsic para indicar la presencia del recubrimiento del carburo de silicio (SiC).

Otra propiedad que debe tomarse en consideración al introducir fibras en una matriz es la similitud de los coeficientes de expansión térmica de ambos materiales. Si la fibra se expande y se contrae a una razón muy diferente a la de la matriz, las fibras pueden romper, o la unión se destruye causando falla prematura.

En muchos compuestos, las capas o chapas individuales de "tejido" se unen. La unión entre estas capas también debe ser buena o puede ocurrir otro problema, la delaminación, esto es que las capas pueden separarse bajo carga y causar falla. Para evitar la delaminación se utilizan compuestos con tejido tridimensional.

### **1.1.1.2 Relación con la matriz**

La matriz de un material compuesto soporta a las fibras manteniéndolas en una posición correcta, transfiere la carga a las fibras fuertes, las protege de sufrir daños durante su manufactura y su uso y evitan la propagación de grietas en las fibras a lo largo del compuesto.

Las fibras soportan la mayor parte de las cargas mientras que la matriz se responsabiliza de la tolerancia al daño (golpes) y del comportamiento a fatiga.

La matriz es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.

Las matrices poliméricas son particularmente comunes. La mayoría de los polímeros, tanto termoplásticos como termoestables están disponibles en grados correspondientes a reforzamiento con fibras de vidrio cortas. Los procesos de moldeo de láminas de compuestos (SMC) y de moldeo en volumen (BMC) son típicos de esta clase de compuestos. Para aplicaciones a temperaturas altas se utilizan poliamidas aromáticas termoestables.

### **Materiales usados como matriz.**

Matrices poliméricas, Curado de termoestables, Resinas de poliéster, Resinas de viniléster, Epoxi, Poliamidas, Polibencimidazoles, Matrices fenólicas y de carbono, Matrices termoplásticas, Matrices metálicas, Matrices cerámicas.

## **1.2 Características de los refuerzos fibrados**

Las fibras de un determinado material exhiben un mejor comportamiento desde el punto de vista de la rigidez y de su resistencia, que los mismos materiales en forma sólida sin refuerzo. Este hecho está demostrado por las fibras de vidrio que tienen una resistencia a la rotura por mucho más elevada que la del vidrio en forma de lámina; es decir, se debe a que en las fibras los cristales que la forman se alinean con el eje de la misma, a diferencia de la ubicación al azar de los cristales que se tiene en la lámina descrita.

Una fibra está caracterizada por su elevada relación longitud/diámetro, debiéndose tener en cuenta que este diámetro es cercano al tamaño de los cristales. En la tabla 1.1 se pueden observar la resistencia y rigidez de algunas fibras en comparación con materiales conocidos.

<b>Fibra o Alambre</b>	<b>Peso Esp. <math>\rho</math> kN/m<sup>3</sup></b>	<b>Tensión Limite en tracción, <math>\sigma_{lim} t</math> GN/m<sup>2</sup></b>	<b><math>\sigma_{lim} t / \rho</math> 10<sup>3</sup> m</b>	<b>Modulo Elástico, E GN/m<sup>2</sup></b>	<b>E/<math>\rho</math> 10<sup>6</sup> m</b>
<b>Aluminio</b>	26,3	0,62	24	73	2,8
<b>Titanio</b>	46,1	1,9	41	115	2,5
<b>Acero</b>	76,6	4,1	54	72	2,7
<b>Vidrio E</b>	25,0	3,4	136	86	2,9
<b>Vidrio S</b>	24,4	4,8	197	190	3,5
<b>Carbono</b>	13,8	1,7	123	190	14
<b>Berilio</b>	18,2	1,7	93	300	16
<b>Boro</b>	25,2	3,4	137	400	16
<b>Grafito</b>	13,8	1,7	123	250	18

Tabla 1.1 Propiedades de algunas fibras\*

Puede notarse que el peso específico juega un rol importante ya que se pueden definir las relaciones resistencia/peso y rigidez/peso las cuales son utilizadas como indicadores de efectividad de la fibra, especialmente cuando el peso es un factor importante.

Son tres los tipos de fibra sintética, que por lo común se utilizan para reforzar los materiales plásticos, son el vidrio, la aramida y el carbono. El vidrio es la fibra más utilizada de las tres anteriores siendo, además, de bajo costo. La aramida y

\*[http://www.quiminet.com/art/ar\\_b%2580Z%257F%252BhJ%257B.php](http://www.quiminet.com/art/ar_b%2580Z%257F%252BhJ%257B.php)

el carbono son fibras muy resistentes y de baja densidad, su ámbito de uso es en aplicaciones aeroespaciales a pesar de su costo que es elevado.

### **1.2.1 Fibra de carbono**

Los materiales compuestos fabricados a base de fibras de carbono reforzando matrices resinosas de naturaleza plástica como las epoxi, se caracterizan por ser una combinación de escaso peso, alta estabilidad dimensional, conductor de la corriente, alta resistencia y tenacidad (módulo de elasticidad). Estas propiedades hacen a los materiales compuestos plásticos de fibras de carbono especialmente apropiados para aplicaciones aeroespaciales.

Desafortunadamente, el costo de estas fibras hace casi imposible su uso en aplicaciones más comunes como automóviles.

La fibra de carbono para estas aplicaciones proviene generalmente de dos fuentes, poliacrilonitrilo (PAN) y brea, las cuales reciben el nombre de *precursores*. En general, la fibra de carbono se produce a partir de fibras precursoras de PAN en tres etapas de elaboración.

**La primera etapa** es la *fase de estabilización* de las fibras de PAN, donde son estiradas para formar una malla o red fibrilar paralelamente a un eje, para luego ser oxidadas en aire a una temperatura aproximada de 200 a 220 °C mientras se mantienen en tensión.

**La segunda etapa** para producir fibras de carbono de alta resistencia es la *carbonización*. Durante este proceso las fibras estabilizadas son calentadas hasta su transformación en fibra de carbono mediante la eliminación de O, H y N de la fibra original.

Este tratamiento se realiza generalmente en atmósfera inerte a temperatura de 1000 a 1500 °C.

Durante la carbonización se forman hebras o cintas de estructuras estratificadas como el grafito dentro de cada fibra, aumentando enormemente la resistencia a la tensión del material.

La tercera etapa es el *tratamiento de grafitización*, se emplea si lo que se desea es un aumento del módulo de elasticidad a expensas de una alta resistencia a la tracción. La grafitización se hace a temperaturas superiores a los 1800 °C y durante esta etapa aumenta el grado de orientación preferida de los cristales tipo grafito dentro de las fibras.

El aumento del módulo a través de una mayor temperatura de grafitización, generalmente resulta en una disminución de la resistencia a la tensión y

viceversa. Cuando el módulo aumenta junto con la grafitización, resulta en un aumento de conductibilidad térmica y eléctrica.

### **1.2.2 Fibra de vidrio**

Las fibras de vidrio se usan en el refuerzo de matrices plásticas para formar compuestos estructurados y productos moldeados.

Los materiales compuestos de plástico y fibra de vidrio tienen entre otras las siguientes características: buena relación resistencia/peso, buena estabilidad dimensional, buena resistencia al calor, al frío, y a la humedad, aislantes de la electricidad, fáciles de fabricar y relativamente baratos.

Las dos clases más importantes de fibra de vidrio que se utiliza en la industria de los materiales compuestos son el vidrio E (eléctrico) y el vidrio S (estructural). El vidrio S tiene una relación resistencia/peso más alta y tiene mayor costo que el vidrio E, se utiliza fundamentalmente para aplicaciones aeroespaciales y militares.

Las fibras de vidrio se obtienen mediante el estirado de monofilamentos de vidrio que provienen de un horno que contiene vidrio fundido, reuniendo un elevado número de esos filamentos se forma un cordón de fibras de vidrio. Los cordones son posteriormente utilizados para hacer hebras de fibra de vidrio o mechas que constan de una colección de haces de filamentos continuos. Las mechas pueden darse en forma de cordones continuos o entretejidos para formar mechas urdidas. Las mallas para reforzar las fibras están hechas de cordones continuos o cortados. Dichos cordones están generalmente unidos por una sustancia resinosa. Las mallas combinadas están hechas con mechas entrelazadas, químicamente enlazadas a las mallas de cordones cortados.

En la figura 1.1 se puede observar un esquema básico del proceso de fabricación de las fibras de vidrio y de los productos obtenidos a partir de ellas.

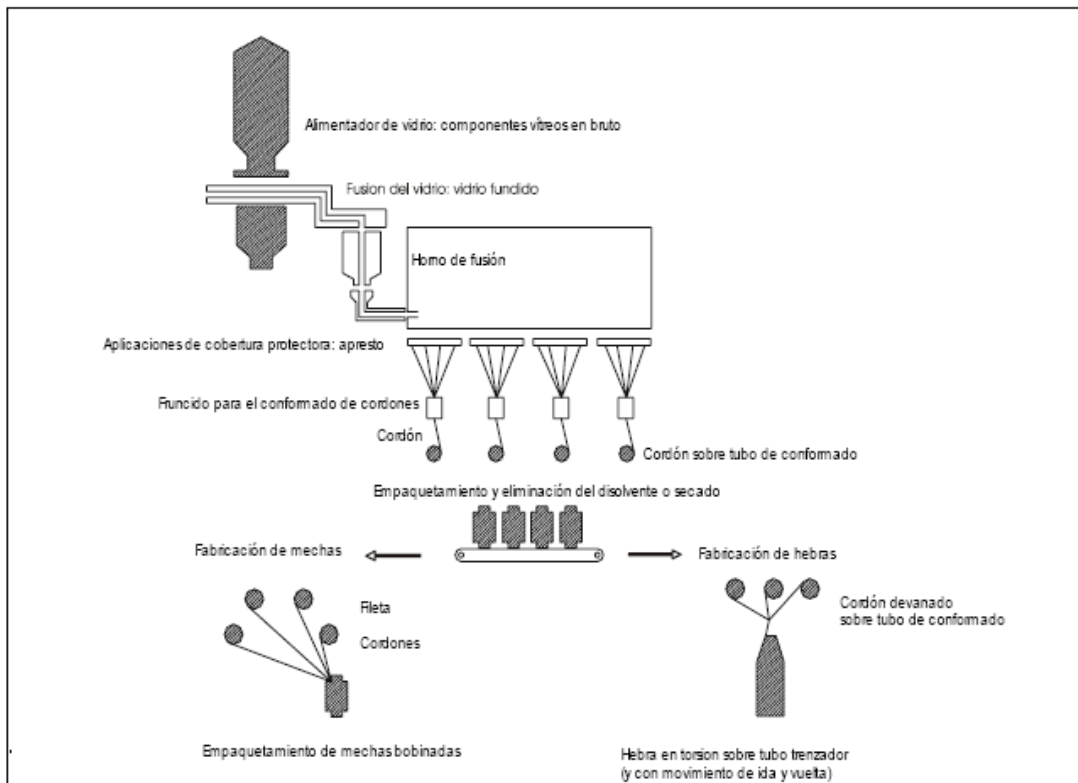


Figura 1.1 Proceso de manufactura de la fibra de vidrio.

El elevado uso de las fibras de vidrio en el bobinado de filamentos se debe a su bajo costo, estabilidad dimensional, buen comportamiento frente a impactos, resistencia y módulos moderados, y facilidad de manejo.

### 1.2.3 Fibras naturales

Desde la forma de su estructura, las fibras vegetales se clasifican en cuatro tipos principales. En primer lugar, las fibras de semillas, que forman el pelo suave que envuelve las semillas de algunas plantas. El segundo tipo es el de las fibras de liber (las cuales son fibras fuertes que crecen entre la corteza y el tallo de muchas plantas dicotiledóneas). Las fibras vasculares son las fibras que se pueden hallar en las hojas y en los tallos de las monocotiledóneas, y el cuarto tipo es el constituido por los tallos completos de algunas gramíneas. Las especies que aportan el mayor volumen de fibras a nivel mundial se clasifican en:

**Abacá:** Cábamo de Manila: Utilizado en la fabricación de cordeles y revestimientos para cables de telégrafos.

**Algodón:** Elaboración de hilos y telas. De la semilla se extrae aceite para alimentos.

**Cábamo:** Se utiliza en la manufactura de cordeles, la estopa se usa para empaques.



**Apocia:** Utilizada para la producción de cordeles gruesos y materiales para costal.

**Lino:** Sus fibras son materia prima para la textilera, de la semilla se obtiene aceite para pintura sobre óleo.

**Ramio:** Sus fibras se utilizan para producir hilazas y cuerdas gruesas, cables, cordeles; aislamiento de cables, tuberías para incendios, redes para pesca y bandas industriales.

**Sisal:** Se utiliza para elaborar cordelería marítima, por la acción de resistir el agua salada.

**Yute:** Por sus propiedades de flexibilidad y brillo, se utilizan en el tejido de alfombras, telas para muebles y cortinas.

**Fique:** Se usa para elaborar cordeles, redes, sacos, alfombras y adornos.

La utilización de este tipo de fibras sin duda un gran atractivo económico, debido a sus bajos costos, pero su aplicación para la fabricación de diversos productos también tiene implícita una serie de ventajas y desventajas que deben ser consideradas desde el momento del diseño hasta las condiciones bajo las cuales va a ser manufacturado el producto, tales ventajas y desventajas se presentan en la tabla 1.2:

<b><i>VENTAJAS</i></b>	<b><i>DESVENTAJAS</i></b>
<i>Fibras de baja densidad, ayudan a generar compuestos mas ligeros.</i>	<i>No se pueden utilizar a temperaturas altas por periodos largos de tiempo, ya que se degradan.</i>
<i>Amplia variedad de fibras para su selección y uso.</i>	<i>Su uso se restringe a ciertos polimeros, los cuales no deben emitir gases ni vapores peligrosos.</i>
<i>No son corrosivas.</i>	<i>Absorben gran humedad, y pueden generar vapores que formen porosidades.</i>
<i>Debido a que se generan en grandes cantidades, se usan en igual proporcion y dan compuestos de mejores propiedades.</i>	
<i>Son de facil reprocesamiento.</i>	
<i>Se degradan en menor tiempo.</i>	
<i>Bajo costo.</i>	

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de la utilización de fibras naturales.<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Adolfo Altamirano M. Estudio comparativo de pruebas de tracción de materiales compuesto de bagazo de caña y bagazo de agave, Tesis 2008. pp.33

### 1.3 Fibras de Origen Vegetal

Las fibras de origen vegetal han adquirido innumerables aplicaciones en los últimos años, principalmente en la industria del papel, el algodón y el lino son la base de algunos papeles de rugosos de calidad, mientras algunas gramíneas, como el Cábamo, el yute y el Cábamo de Manila se utilizan para fabricar papeles de embalaje y otros de menor calidad. El papel de los periódicos y el papel de tipo Kraft se manufacturan de madera tratada químicamente con fibras de madera y bagazo de caña de azúcar y mediante un proceso similar al de la fabricación del papel, se obtienen tableros para la construcción, además de otro tipo de productos como bases para mesa, perfiles, láminas, hasta componentes que pueden ser utilizados en el sector automotriz.

Una vez que se tiene referencia acerca del origen y características de las fibras naturales, los usos de estas para reforzar materiales poliméricos se están inclinando hacia los grandes avances tecnológicos y de investigación en la fabricación de estos compuestos, entre los que destacan:

- Polietileno y polipropileno reforzados con madera.
- Polímeros biodegradables con fibras de algas
- Compuestos con fibras de palma
- Compuestos de PVC y SAN con fibras de henequen.
- Compuestos de matriz de polipropileno con fibras de aserrín de eucalipto.
- Compuestos formados por una matriz acrílica.

A continuación se mencionaran algunos de los más sobresalientes:

#### 1.3.1 Compuestos de Rastrojo de Piña

El laboratorio de Polímeros-POLIUNA de la Universidad Nacional, en Costa Rica y el laboratorio de Adhesión y Adhesivos de la Universidad de Alicante, España, desarrollaron un trabajo para reforzar resinas de poliéster con rastrojos de piña; en este proyecto se prepararon materiales compuestos con fibra de distinta longitud, y con diferente porcentaje de la misma, el objetivo fue realizar la evaluación de las propiedades del compuesto a través de la densidad, resistencia a la ruptura por tensión, flexión y energía de impacto. De estos estudios se observó una mejora en la resistencia a la ruptura por tensión, flexión y energía de impacto.

De estos estudios se observó una mejora en la resistencia a la ruptura por tensión, con valores cercanos a los 20 (MPa.)

A su vez se realizó el análisis de la interface entre la fibra y la matriz, por microscopia electrónica de barrido (SEM), lo cual dio como resultado que no existe una buena adhesión entre la fibra y la matriz. Sin embargo. “Se encontró que esta adhesión puede ser incrementada por el aumento en la presión de moldeo durante la preparación del material”.<sup>‡</sup>

Algo importante de destacar en este trabajo es que los porcentajes que son utilizados solo llegan al 20 %(porcentaje en masa) , aunque utilizan variaciones de longitud entre 0.05 y 1.5 (mm), además de que el proceso de fabricación fue muy “rudimentario” ya que se formaron laminas con una mezcla “la cual se vertió sobre el molde y se dejó curar por un periodo de dos horas a temperatura ambiente”.

Sin embargo, las pruebas se elaboraron bajo las normas ASTM, lo cual puede ser considerado como condiciones satisfactorias para una mejor obtención de resultados, los cuales presentaron una mejoría de acuerdo a lo expresado en el artículo en comparación con los datos que tensión de la resinas de poliéster, aunque no presentan los datos de este último.

#### **ENSAYO VALOR**

<i>Densidad aparente (g/cm )</i>	<i>1,19 ± 0,01</i>
<i>Fuerza de tensión (MPa)</i>	<i>16,1 ± 0,5</i>
<i>Módulo de Young (MPa)</i>	<i>89 ± 6</i>
<i>Fuerza de flexión (Mpa)</i>	<i>122,4 ± 0,3</i>
<i>Energía de impacto (J/m)</i>	<i>9 ± 1</i>

Tabla 1.3 Propiedades físicas y mecánicas del compuesto resina poliéster y rastrojo de piña.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 1.3 es notoria una mejoría ya que existe un aumento en el Módulo del compuesto en comparación con el de la matriz por si solo, lo cual indica que hay un mayor almacenamiento de energía por parte del compuesto para soportar esfuerzos.

---

<sup>‡</sup> Quesada-Solís K., Alvarado-Aguilar P., et al. Utilización de las fibras de rastrojo de Piña como material en resinas Poliéster. Laboratorio de polímeros-POLIUNA, Universidad Nacional. Costa Rica. Laboratorio de adhesión y adhesivos, Universidad de Alicante, Revista Iberoamericana de Polímeros, Volumen 6(2), España, 2005.

### 1.3.2 Plásticos reforzados con madera

Sin duda, la madera por sí sola representa uno de los compuestos más interesantes para ser analizados, sin embargo y a pesar de que existen muchos estudios y experimentos con plásticos reforzados con madera. De acuerdo con las investigaciones, estos materiales presentan ventajas significativas frente a la madera por sí sola, "pues además de ser más livianos, son más resistentes a insectos y microorganismos", y por esto mismo, requieren menos mantenimiento. Sin embargo, algunas propiedades mecánicas de la madera siguen siendo insuperables.<sup>§</sup>

Hoy en día se hacen investigaciones encaminadas a desarrollar materiales compuestos de plástico y madera en América Latina, algunas tan solo a nivel experimental y otras ya a punto de llevarse a cabo en el proceso productivo.

Un ejemplo de ello es el caso del proyecto en el que participa la empresa brasileña Industrial Madeireira Uliana Ltda., dedicada al procesamiento de madera, que desde hace algunos años, en un esfuerzo por darle valor agregado a sus desechos, comenzó a trabajar en un proyecto para la fabricación de este tipo de materiales. La iniciativa, fomentada por el gobierno brasileño a través del IBAMA (Instituto Brasileño de Ambiente y Recursos Naturales Renovables), está a punto de dar fruto. En este momento, Uliana, junto con otras tres compañías, Indusparquet Ltda., empresa Madeira, y PoliBrasil S.A. e Interject Ind. Y com. De Plásticos Ltda., empresas que trabajan con resinas termoplásticas, planean crear una nueva compañía para fabricar probablemente perfiles extruidos e ingresar sus productos al mercado norteamericano y europeo.

Un proyecto similar se lleva a cabo en Chile, donde se están realizando las negociaciones para construir una planta de gránulos de material compuesto de madera y plástico con una capacidad de 800 (Kg/h). El desarrollo de la tecnología fue realizado por la unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción.

A partir de iniciativas que comenzaron en el año 2000, este Instituto está a punto de lograr sus objetivos; dentro de las aplicaciones que se han considerado están en contacto con el agua, especialmente agua de mar, además, se está avaluando con el ministerio chileno la posibilidad de la fabricación de componentes para fabricar muelles pesqueros, cubiertas, estructuras soportantes, barandas y otros componentes más sofisticados, como partes de bloques o partes para el cultivo de salmón.

---

<sup>§</sup>[http://www.plastico.com/pragma/documenta/plastico/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARTICULOS/REPORTAJESHOME/doc\\_41542\\_HTML.html?idDocumneto=41542](http://www.plastico.com/pragma/documenta/plastico/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARTICULOS/REPORTAJESHOME/doc_41542_HTML.html?idDocumneto=41542) (julio 2005)

En Argentina, la Unidad de Madera del Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI, también ha trabajado en este tema. A partir de 1997, ambas partes trabajaron hasta alcanzar un nivel de planta piloto en la fabricación de placas que después se conformaban por presión y calor para obtener productos finales con una forma determinada, los resultados fueron la obtención de una familia de materiales, con distintas propiedades, densidades, componentes, propiedades mecánicas, y en consecuencia con distintas posibilidades y utilidades. Algunas de las aplicaciones evaluadas estuvieron ligadas al área de la construcción, como cerramientos internos, puertas, tejas, techos, piso y otras aplicaciones agrarias, como pósters y cartelería. Este proyecto concluyó la etapa piloto y actualmente se encuentran en el proceso de conseguir la financiación para pasar a una etapa industrial.

Existen muchos otros casos de investigación sobre la elaboración de materiales compuestos de resinas plásticas y madera. En Colombia por ejemplo, en la Universidad de Los Andes, se ha trabajado no sólo con aserrín sino con otro tipo de fibras ligno-celulosicas. También, en la Universidad de San Francisco en Brasil, se han llevado a cabo investigaciones en este tema con muy buenos resultados.

Algunos datos importantes de destacar en estos han sido la reducción de costo del material compuesto, pues para obtener precios competitivos se debe optimizar la concentración de madera en altos niveles, más allá del 50% (porcentaje en masa). De igual forma se debe tener en cuenta que al contar con una concentración considerable de madera, la viscosidad del material aumenta, lo que hace que este fluya menos, y los procesos se deben adaptar.

### **1.3.3 Polipropileno Reforzado con Sisal**

Este fue un estudio realizado por la Dirección de Tecnología del Centro Tecnológico Repsol y el Departamento de Física y Polímeros del Instituto de Ciencia y Tecnología en Polímeros de Madrid España, en donde se realizó un compuesto de matriz de Polipropileno y refuerzo de fibras de Sisal. Y al igual que en los casos anteriores, se logró la presencia de composiciones en porcentajes masa y longitudes variadas de las fibras, el proceso es muy similar al del estudio del compuesto de rastrojo de piña, una cantidad de matriz que fue mezclada con las fibras para posteriormente formar laminas por "compresión de discos calientes", se hizo también una observación bajo microscopia electrónica para observar el comportamiento de la interface.

Los resultados presentan una mejoría en propiedades térmicas cuando el tamaño de fibras es mayor, aunque "a mayores tamaños de fibras presentaron una reducción en la dureza Rockwell R. pero un aumento en la Rigidez y en el

Modulo de flexión" y algo importante a destacar es la buena adhesión entre la matriz y el refuerzo de fibras.\*\*

## 1.4 Los Plásticos

Los polímeros naturales procedentes de plantas y animales, en donde se incluyen madera, caucho, lana, cuero, y seda, además de proteínas, enzimas, etcétera, han sido utilizados desde prácticamente las primeras civilizaciones. Desde los comienzos del siglo xx, la investigación ha determinado la estructura molecular de este grupo de materiales y ha desarrollado numerosos polímeros, sintetizados a partir de moléculas orgánicas, pero es a finales de la Segunda Guerra Mundial que se ha tenido una mayor evolución por la aparición de polímeros sintéticos.

La polimerización es el resultado del proceso por el cual moléculas pequeñas mejor conocidas como monómeros se van uniendo hasta formar moléculas más grandes. El resultado de las síntesis moleculares proporciona propiedades comparables a las de otros materiales análogos a ellos, y sobre todo muestran una gran flexibilidad para ser empleados en diferentes aplicaciones, con lo cual han dado solución a numerosas limitaciones que existen en los materiales tradicionales a tal grado que cada día se desarrollan nuevas tecnologías para su obtención.

Como ya mencionamos, los plásticos pueden ser naturales o elaborados por procesos humanos, es por ello que podemos identificar ciertas materias primas, productos intermediarios y materias plásticas obtenidas las cuales podemos apreciar a continuación:

Como es sabido, la estructura orgánica de los polímeros sintéticos está formada por hidrocarburos, es decir, compuestos formados por carbono e hidrogeno con enlace interatómico covalente, formado este cuando cada uno de los átomos que participan en el enlace contribuye con un electrón. Los grupos más comunes de hidrocarburos se mencionan en la tabla 1.3 donde R y R` representan grupos de átomos que permanecen como una simple unidad y mantienen su identidad durante las reacciones químicas.

Estas estructuras son gigantescas si se comparan con las moléculas de los hidrocarburos hasta hoy conocidos, en la mayoría de los polímeros, estas

- 
- Sisal: Fibra proveniente del agave (familia de las Agaváceas) muy similar al henequén; se utiliza para elaborar cordelería marítima, por la acción de resistir agua salada, además de dar gran flexibilidad y resistencia mecánica.

\*\* J.M. Arribas, F.J. Gómez et al. Compuesto de polipropileno con fibras naturales, Dirección de tecnología del centro tecnológico Repsol y el Departamento de Física y Polímeros del instituto de Ciencia y Tecnología en polímeros de Madrid, Revista de plástico Modernos, Vol.88, no.582. España 2004.

moléculas forman cadenas largas y flexibles, cuyo esqueleto es una hilera de átomos de carbono.

Los polímeros comerciales o estándar son materiales ligeros, resistentes a la corrosión, de baja resistencia mecánica y rigidez y no son adecuados para uso a temperaturas altas, presentando aquí su mayor desventaja con respecto a otros materiales, sin embargo aprovechando esta característica, son excelentes aislantes, sobre todo eléctricos.

#### **1.4.1 Características de los termoplásticos**

Los polímeros se clasifican de varias formas: primero, según la manera en que las moléculas son sintetizadas; segundo, en función de su estructura molecular y tercero, por su familia química. Sin embargo, el método más usado para describirlos es en función de su comportamiento mecánico, por termoplásticos y termoestables, de los cuales solo hablaremos de los primeros dado que son los que nos interesan.

Termoplásticos: los cuales se componen de largas cadenas producidas al unir monómeros y se comportan de una manera plástica y dúctil. Un termoplástico es un plástico que, a temperatura ambiente es deformable, y que se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado vítreo cuando se enfría lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de débiles fuerzas Van der Waals (polietileno); fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados (poliestireno). Los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables en que después de calentarse y moldearse pueden recalentarse y formar otros objetos, mientras que en el caso de los termoestables o termoduros, después de enfriarse la forma no cambia y entran en descomposición.

Sus propiedades físicas cambian gradualmente si se funden y se moldean varias veces (historial térmico), generalmente disminuyen estas propiedades. Los termoplásticos más usados son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el metacrilato (PMMA), el policloruro de vinilo (PVC), el politereftalato de etileno (PET), el teflón (o politetrafluoretileno, PTFE) y el nylon (un tipo de poliamida).

Dentro de la familia de los termoplásticos, se puede tener una segunda clasificación de acuerdo a su estructura cristalina en amorfos y semicristalinos como se muestra en la figura 1.2. La figura muestra que existe mayor producción de plásticos comunes y con menores prestaciones, comparados con los plásticos de ingeniería.

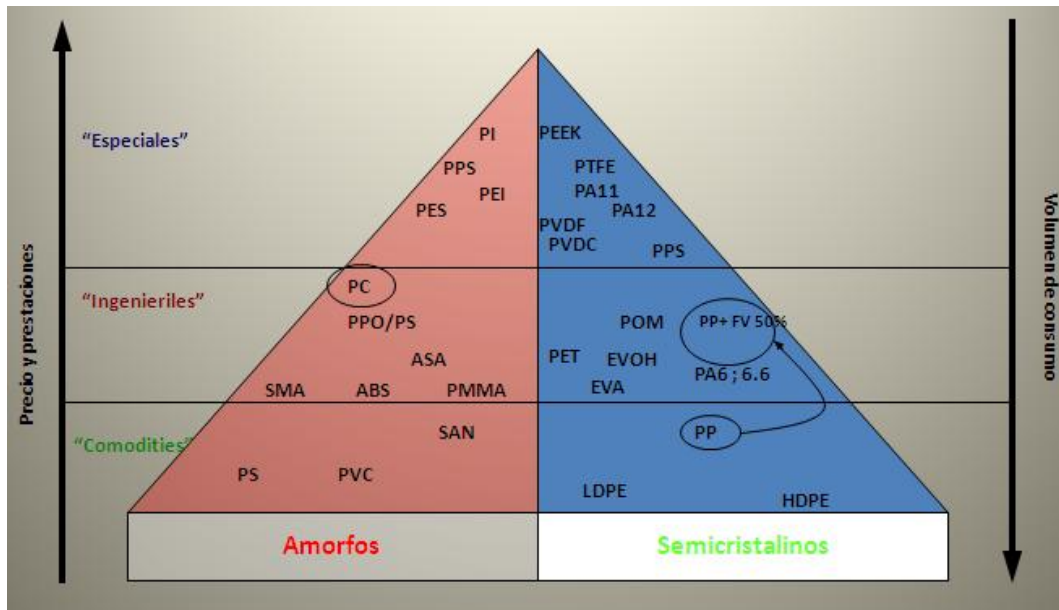


Figura 1.2 Clasificación y consumo de los plásticos.

### 1.4.2 Características del Polipropileno

El polipropileno es un polímero versátil que se utiliza en aplicaciones que van desde películas hasta fibras; su demanda mundial asciende a más de 21 millones de libras, es semejante al polietileno, excepto por la sustitución de un grupo hidrogeno por un grupo metilo en carbonos alternados. Visto superficialmente este cambio puede parecer trivial, pero esta sustitución modifica la simetría de la cadena del polímero. Esto permite la preparación de estéreo isómeros diferentes, denominados de cadena sindiotáctica, isotáctica y atáctica.

El polipropileno (PP) se sintetiza por la polimerización del propileno, un monómero derivado de los productos del petróleo por medio de la reacción que ilustra la figura 1.4.

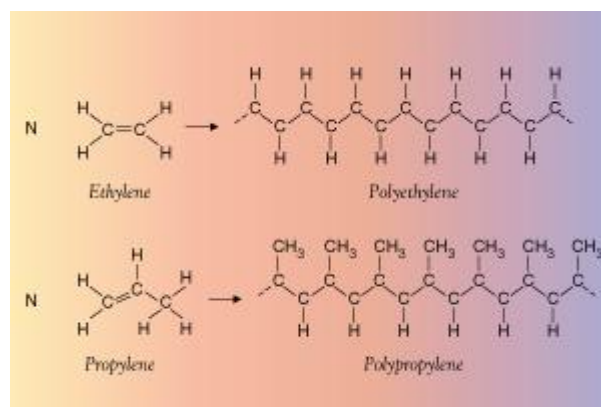


Figura 1.4 Polimerización del polipropileno.<sup>††</sup>

<sup>††</sup> Instituto Mexicano del Plástico Industrial IMPI. Inyección de Plásticos, Curso Teórico Práctico. Edit. Centro Empresarial del Plástico.



No fue sino hasta que se dispuso de los catalizadores de Ziegler-Natta que se pudo polimerizar el polipropileno en un producto comercialmente viable. Estos catalizadores han permitido la regulación de la estereoquímica durante la polimerización para formar polipropileno en las formas isotáctica y sindiotáctica, ambas capaces de cristalizar en un material más rígido útil.

El intervalo de pesos moleculares para el PP es  $M_n = 38000$  a  $60000$  y  $M_w = 220000$  a  $700000$ . la distribución de peso molecular ( $M_n/M_w$ ) puede variar de 2 a 11 aproximadamente.

Es posible encontrar un comportamiento diferente para cada uno de los tres estereoisómeros. El polipropileno isotáctico y el sindiotáctico se pueden empacar dentro de un arreglo cristalino regular, lo que produce un polímero con más rigidez. Ambos materiales son cristalinos, sin embargo el polipropileno sindiotáctico tiene una  $T_f$  menor que el polímero isotáctico, el cual es la forma usada comercialmente., con un punto de fusión de  $165^\circ\text{C}$ . el polipropileno atáctico tiene una pequeña cantidad de cristalinidad ( 5% a 10%) debido a que su estructura irregular evita la cristalización, por ello se comporta como un material suave, flexible. Se emplea en cintas para sellar, laminados de papel y adhesivos.

### **1.4.3 Características del polietileno de alta densidad (HDPE)**

El HDPE es uno de los materiales químicos de mayor producción en el mundo; en 1998 la demanda mundial fue de  $1.8 \times 10^{10}$  Kg. El método de procesamiento de HDPE más común es el moldeo por soplado, en donde la resina se convierte en botellas (especialmente para leche y jugos), utensilios domésticos, juguetes, cubetas, tambores y tanques para gasolina de automóviles. También es común procesarlo mediante moldeo por inyección en utensilios domésticos, juguetes, recipientes para alimentos, cubos para basura, rejillas para leche y estuches. Las películas HDPE se encuentran comúnmente como bolsas en los supermercados, en las tiendas de departamentos y como bolsas para basura. Los métodos comerciales que más se practican son dos; en uno se emplean catalizadores Phillips (óxido de cromo) y en el otro, sistemas de catalizadores de Ziegler-Natta (soportado con catalizadores heterogéneos como halogenuros de titanio, ésteres de titanio y alquilos de aluminio sobre un soporte químicamente inerte, por ejemplo: PE o PP). El peso molecular depende sobre todo del control de la temperatura, ya que una alta provoca pesos moleculares reducidos. El soporte del catalizador y sus propiedades químicas también actúan como un factor importante en el control y la distribución del peso molecular.

#### 1.4.4 Características del Poliestireno

El PS es uno de los cuatro plásticos cuyos usos combinados corresponden al 75% del uso mundial de los plásticos. Estos cuatro termoplásticos para diferentes artículos son PE, PP, PVC y PS. Aunque se pueden polimerizar por la vía de radicales libres, mecanismos aniónicos, catiónicos y Ziegler, los PS disponibles comercialmente se producen mediante la polimerización por adición de radicales. La popularidad de los PS se debe a su transparencia, baja densidad, modulo relativamente elevado, excelentes propiedades eléctricas, bajo costo y facilidad de procesamiento. El impedimento estérico que ocasiona la presencia de grupos voluminosos insertados en el benceno provoca propiedades mecánicas quebradizas, con alargamientos finales de solo alrededor del 2 al 3%, lo que depende del peso molecular y los niveles de adición. La mayor parte de los grados de PS comercialmente disponible son atácticos y esto, en combinación con los grandes grupos bencénicos, da como resultado un polímero amorfo. La morfología amorfa proporciona no solo transparencia, sino también la falta de regiones cristalinas, lo que significa una temperatura no definida con claridad a la cual el plástico se funde. El PS es un sólido vídrioso hasta que alcanza su  $T_v$  de 100°C, al rebasarla cualquier calentamiento posterior gradualmente transformara al plástico de un cristal a un líquido. Los moldeadores toman ventaja de esta transición gradual, ya que pueden expulsar piezas que se han enfriado por debajo de la temperatura Vicat relativamente elevada.

También, en vista de que no hay una temperatura de cristalización, significa que es posible lograr niveles altos de calentamiento y enfriamiento, lo que reduce el tiempo del ciclo y posibilita un proceso económico. Finalmente, después del enfriamiento del PS no cristaliza en la forma en que lo hacen el PE y el PP. Esto le confiere al Ps valores menores de contracción (0.004 a 0.005 mm/mm) y estabilidad dimensional elevada durante las operaciones de moldeo y formación.

El PS comercial es segmentado en grados según su facilidad de flujo, flujo medio y alta resistencia al calor. Estos tres grados se comparan en la tabla los grados de flujo fácil tienen el peso molecular más bajo; se les adiciona de 3 a 4% de aceite mineral. Este reduce la viscosidad a la fusión, lo que los hace adecuados para aumentar la velocidad de inyección mientras se moldean piezas de paredes delgadas, de bajo costo, como platos desechables, juguetes y empaques. La reducción en el tiempo del proceso se obtiene al costo de una temperatura de ablandamiento más baja y de un polímero más quebradizo. Los grados de flujo medio tienen un peso molecular ligeramente más alto y contienen solo de 1 a 2% de aceite mineral. Sus aplicaciones incluyen tambores moldeados por inyección, utensilios médicos, juguetes, botellas moldeadas por inyección y soplado y empaques extruídos para productos alimenticios. Los plásticos de gran resistencia al calor tienen mayor peso molecular y el nivel mas

bajo de aditivos, por ejemplo, de ayudas para la extrusión. Estos productos se emplean en la extrusión de hojas y en la termoformación de películas extruídas que se aplican a empaques destinados para alimentos.

## **Capítulo 2 REFUERZOS NATURALES Y PROCESOS DE INYECCIÓN**

Entre los refuerzos naturales que se han estudiado comúnmente, encontramos a las fibras de bagazo de piña, fibras de bagazo de agave, fibras de bagazo de caña, por mencionar algunos; lo que se estudiará en este trabajo es el bagazo de fibra de Nopal, cada uno de ellos se explicará a continuación, y se hará una descripción de su extracción, su proceso y algunas aplicaciones. Así mismo, se darán a conocer las instituciones que han trabajado con estas fibras y la investigación que han llevado a lo largo del proceso.

### **2.1 Rastrojo de piña, bagazo de caña y madera**

La Universidad de Costa Rica estudió el comportamiento del compuesto bagazo de piña en matrices de polietileno, poliestireno y polipropileno, para encontrar las propiedades mecánicas de estos compuestos. El rastrojo de piña fue suministrado por la compañía productora de piña Collen Street Bakery, ubicada en la Zona Norte de Costa Rica. La variedad de piña utilizada fue la (champaka), la cual se secó en un secador solar, se trituró en molino de martillos para después tamizarse y obtener tamaños de fibra de 125 a 2,000 mm.

El rastrojo se cortó en tiras de 1 cm de ancho y se colocó en un recipiente de vidrio. Se añadieron 600 ml de reactivo aceto-nítrico (ácido acético 80% y ácido nítrico concentrado 10:1) como agente separador, para mantenerse en esa solución hasta que las fibras se soltaran. Se lavó el material y se coloreó con safranina (2% en etanol). Una vez separadas las fibras se realizaron las mediciones del diámetro utilizando un microscopio óptico. Se realizaron 100 mediciones de diámetro a lo largo de varias de las fibras analizadas. Posteriormente las embebieron en las matrices correspondientes mediante extrusión para al final obtener muestras ASTM para tracción, flexión y dureza. Ellos demostraron que no hubo cambios significativos en los resultados de las pruebas mecánicas, que comprobando con microscopía electrónica demostraron la falta de adherencia entre las matrices y las fibras. Sin embargo, establecieron un proceso para la preparación de la fibra.

Existen varios trabajos sobre la incorporación de fibras de caña de azúcar en matrices plásticas ya que esta tiene una disposición de 11 millones de toneladas, base seca, de bagazo de caña, el cual tiene una cantidad importante de fibra natural. El proceso previo para la extracción de jugos y azúcares sirve como un pre-tratamiento de la caña, facilitando la recuperación de las fibras.

Las fibras se obtienen a partir de médula de bagazo de caña, la cual, previamente secada, pasa por molida en un molino de martillos y

posteriormente separada del parénquima. A esta fibra no se le aplicó lavado o preparación superficial dado que los ingenios se encargan de dejarla seca.

Uno de los trabajos encontrados respecto al manejo del bagazo de caña de azúcar, fue realizado por el Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ), quienes utilizaron un polietileno en polvo de grado comercial "Polimers 94050 Plus" suministrado por Polímeros Mexicanos S.A. de C.V., específico para rotomoldeo, con una densidad media natural de 0.935 gr/cm<sup>3</sup> y un índice de fluidez de 5.8 gr/10 min. La idea que plantearon fue la posibilidad de emplear estos compuestos en componentes o piezas mediante rotomoldeo.

La fibra y el polímero se suministraron directamente en la cavidad del molde, el cual una vez cerrado se hizo rotar durante 5 minutos fuera del horno para asegurar un adecuado mezclado de las fibras. Pasado este tiempo, se introdujo a un horno de flama cerrada tipo shuttle a una temperatura aproximada de 300°C. El tiempo de horno fue de 10 minutos. Posteriormente, el molde fue retirado del horno y enfriado con aire por 5 minutos, con una neblina de agua. Se dejó otros 3 minutos con aire y se dio un segundo enfriamiento con agua, procediendo a abrir el molde y sacar la pieza final.

Si bien los procesos que comúnmente se utilizan para trabajar con estos compuestos son principalmente extrusión y moldeo por inyección, el rotomoldeo puede ser de particular interés dadas sus características y expansión en los últimos años. Este proceso, ampliamente utilizado en la fabricación de contenedores de agua y piezas huecas de gran tamaño, ha tenido en los últimos 20 años una gran transformación.

Hoy en día se hacen investigaciones encaminadas a desarrollar materiales compuestos de plástico y madera en América Latina, algunas tan sólo a nivel experimental y otras ya a punto de llevarse a cabo en el proceso productivo. Un ejemplo de ello es el caso del proyecto en el que participa la empresa brasileña Industria Madeireira Uliana Ltda., dedicada al procesamiento de madera, que desde hace algunos años, en un esfuerzo por darle valor agregado a sus desechos, comenzó a trabajar en un proyecto para la fabricación de este tipo de materiales. La iniciativa, fomentada por el gobierno brasileño a través del IBAMA (Instituto Brasileño de Ambiente y Recursos Naturales Renovables), está a punto de dar frutos. En este momento, Uliana, junto con otras tres compañías, Indusparquet Ltda., empresa maderera, y PoliBrasil S.A e Interject Ind. y Com. de Plásticos Ltda., empresas que trabajan con resinas termoplásticas, planean crear una nueva compañía para fabricar probablemente perfiles extruidos e ingresar sus productos al mercado norteamericano y europeo.

Un proyecto similar se lleva a cabo en Chile, donde se están realizando las negociaciones para construir una planta de gránulos de material compuesto de

madera y plástico con una capacidad de 800 (Kg/h). El desarrollo de la tecnología fue realizado por la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción.

A partir de iniciativas que comenzaron en el año 2000, este Instituto está a punto de lograr sus objetivos; dentro de las aplicaciones que se han considerado están estructuras en contacto con el agua, especialmente agua de mar, además, se está evaluando con el ministerio chileno la posibilidad de la fabricación de componentes para fabricar muelles pesqueros, cubiertas, estructuras soportantes, barandas y otros componentes más sofisticados, como partes de buques o partes para el cultivo de salmón.

Existen muchos otros casos de investigación sobre la elaboración de materiales compuestos de resinas plásticas y madera. En Colombia por ejemplo, en la Universidad de Los Andes, se ha trabajado no sólo con aserrín sino con otro tipo de fibras ligno-celulósicas. También, en la Universidad de San Francisco en Brasil, se han llevado a cabo investigaciones en este tema con muy buenos resultados. Algunos datos importantes de destacar en estos han sido la reducción de costos del material compuesto, pues para obtener precios competitivos se debe optimizar la concentración de madera en altos niveles, más allá del 50% (porcentaje en masa). De igual forma se debe tener en cuenta que al contar con una concentración considerable de madera, la viscosidad del material aumenta, lo que hace que éste fluya menos, teniendo siempre que los procesos se deben adaptar.

La madera por sí sola representa uno de los compuestos más interesantes para ser analizados, sin embargo y a pesar de que existen muchos estudios y experimentos con plásticos reforzados con madera. De acuerdo con las investigaciones, estos materiales presentan ventajas significativas frente a la madera por sí sola, "pues además de ser más livianos, son más resistentes a la humedad, tienen una mejor estabilidad dimensional, son resistentes a insectos y microorganismos", y por esto mismo, requieren menos mantenimiento. Sin embargo, algunas propiedades mecánicas de la madera siguen siendo insuperables.

## **2.2 El proceso de Inyección**

El moldeo por inyección es una técnica muy popular para la fabricación de artículos muy diferentes. Sólo en los Estados Unidos, la industria del plástico ha crecido a una tasa de 12% anual durante los últimos 25 años<sup>††</sup>, y el principal proceso de transformación de plástico es éste seguido del de extrusión.

---

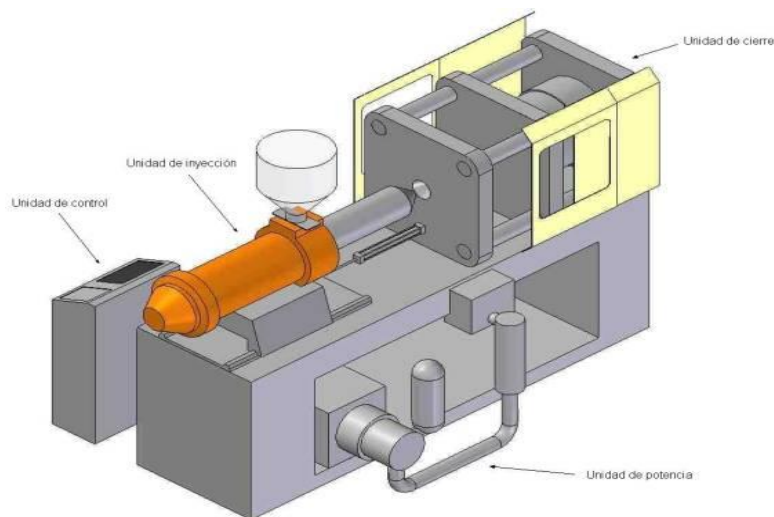
<sup>††</sup> Instituto Mexicano del Plástico Industrial IMPI. Inyección de Plásticos, Curso Teórico Practico. Edit. Centro Empresarial del Plástico 2da. Ed., Volumen 3, México 2000, pp.435

La popularidad de este método se explica con la versatilidad de piezas que pueden fabricarse, la rapidez de fabricación, el diseño escalable desde procesos de prototipos rápidos, altos niveles de producción y bajos costos, alta o baja automatización según el costo de la pieza, geometrías muy complicadas que serían imposibles por otras técnicas, las piezas moldeadas requieren muy poco o nulo acabado pues son terminadas con la rugosidad de superficie deseada, color y transparencia u opacidad, buena tolerancia dimensional de piezas moldeadas con o sin insertos y con diferentes colores.

**Una inyectora se compone de cuatro unidades principales:**

1. La unidad de cierre
2. La unidad de inyección
3. La unidad de potencia
4. La unidad de control

Tal como se muestra en la figura 2.1 siguiente:

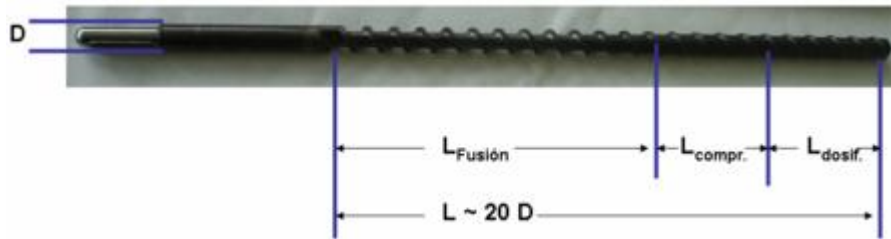


**Figura 2.1** Máquina de inyección con sus diferentes unidades de operación.

La efectividad de una máquina de inyección se basa en la cantidad de presión que esta pueda generar, por dos razones principales:

- 1. Incrementando la presión se puede inyectar más material
- 2. Incrementando la presión se puede disminuir la temperatura, que se traduce en menor costo de operación.

Es aconsejable utilizar el cañón más largo posible si se necesita mezclar compuestos, y también hacer énfasis en el husillo adecuado. A continuación se muestra un husillo típico de laboratorio (figura 2.2) para polioleofinas:



**Figura 2.2** Husillo típico de laboratorio

Aunque las dimensiones de la máquina dependen principalmente de la cantidad de polímero que se necesita para llenar la pieza deseada, es común que los proveedores de máquinas vendan equipos más o menos estándares. Las principales características para determinar las dimensiones de una máquina son: la capacidad de cierre, dimensiones del molde, carrera o recorrido del molde, presión de inyección, capacidad volumétrica de inyección, características de plastificado y velocidad de inyección.

El proceso de inyección de plástico consiste en calentar gránulos o pellets de un material termoplástico para transformarlos en un semifluido, haciéndolo pasar a través de un cilindro y un tornillo de Arquímedes llamándole a esta parte la zona de plastificación, con lo que se le da la forma final en el molde. En el proceso de inyección del plástico es necesario optimizar la relación producción-calidad a través del ajuste adecuado de los parámetros.

La pieza a obtener utiliza un molde diseñado con las características de las formas deseadas. En él, el material se solidifica y se enfría para posteriormente obtener la pieza al abrir el molde y expulsar de la cavidad a la pieza.

Los parámetros más importantes para un proceso de inyección son los siguientes:

### **Ciclo de moldeo en la inyección de plástico**

En el ciclo de moldeo destacan los siguientes pasos principales:

- Molde cerrado y vacío. La unidad de inyección carga material y se llena de polímero fundido.
- Se inyecta el polímero abriéndose la válvula y, con el husillo que actúa como un pistón, se transporta el material a través de la boquilla hacia las cavidades del molde.
- La presión se mantiene constante para lograr que la pieza tenga las dimensiones adecuadas, pues al enfriarse puede contraerse.



- La presión se elimina y la válvula se cierra. El husillo gira para cargar material y al girar también retrocede.
- La pieza en el molde termina de enfriarse. La prensa libera la presión y el molde se abre; las barras expulsan la parte moldeada fuera de la cavidad (figura 2.3).



**Figura 2.3** Piezas moldeadas por el proceso de inyección.

Si la fuerza de cierre es insuficiente, el material escapará por la unión del molde, causando así que el molde se tienda a abrirse. Es común utilizar el área proyectada de una pieza (área que representa perpendicularmente a la unidad de cierre el total de la cavidad) para determinar la fuerza de cierre requerida, excluyendo posibles huecos o agujeros de la pieza.

$$F = P_m \times A_p$$

Donde:

F = Fuerza (N)

P<sub>m</sub> = Presión media (Pa)

A<sub>p</sub> = Área proyectada (m<sup>2</sup>)

### **Relaciones de presión, volumen y temperatura en la inyección de plástico**

- Para obtener un proceso de inyección eficiente, las relaciones entre presión, volumen y temperatura juegan un papel importante, ya que al ascender la temperatura del polímero su volumen específico también aumenta.
- Los polímeros amorfos y semicristalinos tienen un comportamiento diferente durante el enfriamiento, requiriendo parámetros específicos para cada uno de ellos

- En el diseño de equipos de procesos es importante conocer las relaciones de presión, volumen y temperatura de los polímeros que se utilizarán.

### **Cristalización y deformación de la pieza al enfriarse en el proceso de inyección de plástico**

- Al enfriarse, las partes inyectadas se contraen, siendo su volumen menor que el de la cavidad.
- Los polímeros semicristalinos modifican más su tamaño dependiendo de la temperatura en la cual se les permita cristalizar.
- Las cadenas que forman cristales de menor granulometría ocupan menos espacio (mayor densidad) que las cadenas en estado amorfo.
- El grado de cristalinidad afecta directamente a la densidad final de la pieza.
- La temperatura del molde y el enfriamiento deben ser los adecuados para obtener partes de calidad.

### **Coloración de la pieza en la inyección de plástico**

El acabado de la pieza, la identificación y las funciones ópticas dependen de su coloración. Los colores pueden ser opacos y, si el polímero es transparente, se pueden utilizar colores translúcidos.

Existen tres formas de colorear una pieza en los procesos de inyección:

1. Usar plástico del color que se necesita (precoloreados).
2. Usar plástico de color natural y mezclarlo con pigmento en polvo o colorante líquido.
3. Usar un plástico de color natural y mezclarlo con concentrado de color.

Los concentrados de color deben cumplir con la aplicación final de la parte, para utilizar pigmentos o colorantes que no migren a la superficie.

Los colores finales en la parte pueden ser translúcidos, sólidos, pasteles, metálicos, perlados, fosforescentes, fluorescentes, etc.



**Figura 2.4** Pigmentos utilizados en el proceso de inyección.

### **2.2.1 Comparación de parámetros de inyección con materiales sin fibra y con fibras convencionales**

Existen aditivos o pigmentos que agregados en una determinada proporción a algunos materiales moderadamente cristalinos, pueden actuar como nucleantes siendo causa de contracciones y deformaciones. Por analogía inversa el agregado de cargas como las fibras de vidrio, carbono aramidas, o carbonato de calcio reducirán las contracciones y deformación.

La contracción en las piezas inyectadas se verifica en dos sentidos: en dirección del flujo, y transversalmente a este; la mayoría de los polímeros contraerán en el sentido del flujo, cuando se les agrega, fibras de vidrio, carbono u otros aditivos de este tipo, estos se orientarán en el sentido del flujo reduciendo considerablemente la contracción y deformaciones en esta sección de la pieza, con lo cual el mayor nivel de deformación puede verificarse en el sentido transversal.

La velocidad de inyección determina la orientación molecular dentro de la cavidad, una variación de la misma, produce cambios en la orientación molecular y en los esfuerzos de corte entre las cadenas, tanto la orientación, como los esfuerzos de corte, con una alta velocidad de inyección se producen altos esfuerzos de corte y una marcada orientación molecular. Si observamos lo que ocurre al ingresar el material plástico en la cavidad del molde, al estar las paredes mucho más frías que la masa del mismo, una capa se solidifica, formando una cubierta aislante del resto del material que sigue su curso por el centro de la cavidad, todo esto hace que existan zonas de distinta temperatura a través de las piezas inyectadas, inclusive se produce un segundo fenómeno "colateral" que es la necesidad de aumentar la presión de inyección, ya que el material se va solidificando a medida que inyecta y ofrece mayor resistencia al flujo de material. Este aumento de presión muchas veces produce tensiones, rebabas o brillos en la zona cercana al punto de inyección.

Aumentando la velocidad de inyección obtendremos una velocidad de llenado mayor lo cual contribuirá a reducir al mínimo las diferencias de temperatura y una contracción más uniforme y de menor distorsión.

Muchas veces no es posible inyectar con las mayores velocidades de inyección debido a problemas con las salidas de gases del molde, cuando esto ocurre, será necesario revisar el sistema de ventilación de nuestro herramental. Algunas veces los venteos laterales no resuelven el problema, siendo necesario recurrir a soluciones de diseño como los tacos de sinterizado o venteos a través de expulsores.

### **2.2.2 Problemas en Piezas Procesadas por Inyección.**

Es importante señalar que una vez concluido el proceso de moldeo por inyección es común la presencia de "imperfecciones" en las piezas y se deben tomar en cuenta éstas para su fácil identificación al momento de obtener la pieza final. Entre las más relevantes y sus posibles causas y soluciones tenemos:

- **Dificultad de extracción de la pieza del molde.** Sucede generalmente cuando los botadores no tienen la capacidad de eliminar a la pieza una vez concluido el proceso y esta se rompe o simplemente no sale del molde. Esto es observable si: a) Las piezas están demasiado frías, entonces se debe verificar la temperatura del molde. b) Hay un excesivo empaquetamiento del material, es necesario disminuir la presión de inyección. c) Puede haber defectos en el molde ya sea de acabado o de diseño, puede solucionarse esto con un recubrimiento superficial al molde, rectificar la superficie del molde o en última instancia cambiar el mismo. d) Material adecuado, la pieza no está saliendo por que el tipo de diseño requiere un material con un índice de fluidez menor, por lo que se debería cambiar el material.

- **Acabado superficial deficiente de la pieza.** Este se presenta cuando las piezas tienen aspectos no deseados de acuerdo con el diseño previo, esto puede ser por varias circunstancias: a) El material entra frío al molde, por lo que se debe verificar el perfil de temperaturas para el material, la boquilla y el molde. b) El llenado del molde es muy lento, por lo que sería necesario aumentar el perfil de temperaturas como en el caso anterior o, en su defecto, aumentar la presión de inyección. c) Defectos en el molde por diseño, por lo que sería necesario verificar la configuración de los corredores y entradas para la pieza.

- **Burbujas internas en la pieza.** Las cuales se presentan como huecos internos dentro de las piezas; esto sucede si: a) El material en el molde impide una contracción producida por bordes o nervios; se recomienda aumentar la alimentación, el tamaño de la entrada o bien dar un pequeño incremento en la presión de inyección. b) Hay existencia de humedad en el material; aquí lo

recomendable sería dar un secado adecuado del material antes de su procesamiento, o tener un correcto almacenamiento del mismo. c) Por la existencia de una temperatura desigual en el molde; por lo que se deben verificar los canales de alimentación para el enfriamiento del molde, que no se encuentren obstruidos.

- **Ruptura o piezas con grietas.** Lo que puede ser un problema muy frecuente si:  
a) El molde está frío, se tiene que regular su temperatura y verificar que se mantenga más o menos constante. b) Excesivo empaquetamiento del material; esto sucede cuando la presión de inyección es demasiado alta y debe disminuirse.

- **Rebaba:** Los cuales son excesos de material que durante el proceso de llenado salen entre las superficies del molde, este es un problema muy común y suele deberse a:  
a) Una alimentación excesiva de material, por lo que se debe disminuir la cantidad de carga de material. b) Por una elevada presión, o sobrecalentamiento del material, en dicha situación hay que reducir la presión de inyección y hacer una verificación del perfil de temperaturas del material, es importante señalar que este perfil siempre va en función del tipo de material con el que se está rebajando. c) Molde desajustado; generalmente hay un desfase entre los canales que unen a la placa móvil y a la placa fija, por lo que es necesario hacer una calibración del cierre del molde. d) Una caja fuerza de cierre, lo que genera que en el momento de la inyección las placas tengan una pequeña separación generando la rebaba, es muy importante conocer las características de la máquina y saber si la presión o fuerza de cierre que tiene es la indicada para la pieza que se desea inyectar, en el caso de que sea correcta, solo hay que aumentar esta fuerza.

- **Líneas de flujo:** Representadas por secciones ásperas y canales muy marcados en la pieza en una dirección determinada, la cual generalmente se presenta en forma de semicírculo; las razones de su presencia pueden ser variadas:  
a) Se tiene un molde muy frío, aquí se tiene que elevar la temperatura del molde y verificar los canales de enfriamiento. b) Se tiene una baja presión de inyección o el canal de alimentación está obstruido; debe incrementarse la presión de inyección y hacerse una limpieza de la entrada de la boquilla de alimentación del molde. c) No está existiendo una dosificación adecuada, aquí se puede aumentar esta dosificación, hacer un aumento en la velocidad de inyección o en las revoluciones del husillo o bien aumentar el perfil de temperaturas.

- **Piezas incompletas.** Se presenta este problema cuando las piezas no llegan al 100% del volumen de llenado, éste problema se genera por:  
a) Insuficiente carga de material, por lo que debe aumentarse el volumen de llenado o hacer un aumento de la presión de inyección. b) No hay temperaturas uniformes en el molde y/o el perfil de temperaturas no es el adecuado, es importante vigilar

estos parámetros y monitorearlos para evitar estos problemas; también puede aumentarse un poco la velocidad de inyección del material o la dosificación.

- **No hay carga de material.** Se presenta cuando al hacer una inyección esta no es completa o simplemente no se lleva a cabo, las causas: a) La garganta de la tolva está obstruida, por lo que siempre es importante verificar que el material esté libre de cualquier tipo de basura o material ajeno a él, si es así hay que hacer una limpieza de la tolva y del canal de entrada del material. b) El perfil de temperaturas es bajo, esto sucede cuando no se saben las condiciones de procesamiento del material por lo que es indispensable conocer el tipo de material con el que se trabaja y las posibles temperaturas para la inyección.

- **Quemados y manchas negras en las piezas.** Estas son zonas en donde se concentran excesos de temperatura degradando al material y que éste, en consecuencia, genere una pieza de merma, esto se presenta cuando: a) Hay un valor muy alto en el perfil de temperaturas, con lo que se debe disminuir empezando por la boquilla, la que puede considerarse como mayor generadora de esta situación o bien hacer una limpieza del husillo. b) Salida de gases deficiente, generalmente se presenta en materiales con algún aditivo o químico extra y si los gases no se controlan generan dichas quemaduras, por lo que se tendría que tener un sistema de eliminación de gases adecuado.

Como observamos, es importante tener en cuenta todos los problemas que se presentan al obtener productos por el proceso de moldeo por inyección, pero más importante aún es realizar la regularización del proceso antes de comenzar con una producción en serie para evitar la aparición de estos defectos y con ello generar datos erróneos en los ensayos mecánicos, ya que dependiendo el defecto que se presente, este puede tener cierta influencia en dichos ensayos y generar resultados no deseables.

Durante la presentación de los resultados sabremos si las piezas obtenidas presentaron estos problemas y como se llevó a cabo la optimización del proceso.

### **2.3 Utilización de las fibras de nopal en matrices poliméricas.**

En la actualidad, se han realizado investigaciones para diferentes tipos de fibras orgánicas, además de implementar métodos para la extracción y procesamiento de las mismas, en estos procesos se puede remarcar el método de extrusión, de inyección y rotomoldeo, sin embargo se realizó una profunda investigación para tratar de encontrar indicios de algún trabajo anterior relacionado con materiales poliméricos compuestos con fibras de nopal y al parecer aun no se ha trabajado alguno relacionado con esta fibra, por lo tanto sabiendo que no

hay antecedente alguno se ha tomado la decisión de trabajar con métodos para otras fibras.

Lo que se está realizando en este trabajo es la investigación para la elaboración de un nuevo material compuesto por polipropileno, polietileno, poliestireno (cada uno de los anteriores por separado) y el bagazo de fibra de nopal a diferentes concentraciones. Cabe destacar que el material fue preparado en las instalaciones del Centro de Investigación de Asistencia Técnica del estado de Querétaro A.C. CIATECQ y en el Laboratorio de Polímeros de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

La fibra de nopal es abundante al norte y centro del país, la fibra que fue empleada como refuerza es originaria del estado de Querétaro, para la obtención de la fibra de nopal procedente del género opuntia fue necesario primeramente una previa caracterización con varios tipos de cladodios, para seleccionar los adecuados para tal objetivo.

El nopal a simple vista se caracteriza por sus tallos planos en forma de óvulos cubiertos de pequeños agrupamientos de pelos rígidos llamados gloquidios y también de espinas, de color verde con diversos tamaños de cladodios tiernos y viejos en forma de escamas ramificadas con un tallo leñoso, el cuál le da a la planta aspecto de árbol que aproximadamente miden 5 metros de altura, con la ventaja de crecer en cualquier clima, que de tal manera el agua almacenada la utilizan cuando no llueve, por otra parte su reproducción es muy sencilla ya que cuando caen las pencas maduras basta que queden poco enterradas para que renazcan y se reproduzcan.

Dicha caracterización consistió en tocar varios aspectos como: la separación de la materia que aglomera a la fibra con propiedades mecánicas inferiores, por el alto contenido de humedad de cada tipo de cladodio, así como su preparación para compatibilizarla con matrices termoplásticas y aumentar su adherencia, así como también su posible deterioro por sus propiedades hidrométricas de la fibra y su susceptibilidad a la generación de microorganismos como son los hongos, bacterias, pardeamiento enzimático y no enzimático (Buena consistencia).

### Capítulo 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para realizar la parte experimental del material compuesto, se adquirió la cantidad de fibra necesaria para caracterizar las piezas finales con diversas relaciones porcentuales entre la fibra y la matriz. La fabricación del compuesto se llevó a cabo en 2 etapas, la primera sin tratamiento a la fibra y la segunda con tratamiento en ácido maleico y cera polimérica como agentes acoplantes según la literatura encontrada (\* referencia 5 y 7). Se utilizó un molde ASTM 638 para inyectar el material compuesto, que de acuerdo con la norma se obtuvieron piezas para realizar las pruebas de tracción, flexión, dureza, impacto y flamabilidad. Siendo las tres primeras las únicas que se consideraron.

Para obtener piezas homogéneas, fue necesario realizar pruebas de inyección de 10 a 15 pieza por compuesto elaborado, de los cuales se seleccionaron las 5 probetas de mayor homogeneidad, para realizar los ensayos mecánicos correspondientes.

#### 3.2 Determinación de las cantidades de material a utilizar.

Se recibieron mezclas de bagazo de nopal al 15% de fibra en tres matrices diferentes: polipropileno, polietileno y poliestireno. De cada una de las mezclas se procedió, por medio de la regla de las mezclas, a obtener diferentes porcentajes al 15%; es decir, se obtuvieron mezclas con 10% y 5% para cada una de las matrices. También se consideraron las matrices sin fibra. El peso que se consideró para las probetas a inyectar fue de 54 gr en promedio y de acuerdo a las características de cada material. Se consideró 1Kg de material de cada plástico para usarlos como purgante. A las combinaciones de 15% se les consideró como lotes maestros.



Figura 3.1 Representación del lote maestro después del peletizado



### 3.3 Transformación Por Inyección.

Una vez hechas las mezclas, se procedió a fabricar las probetas en un molde de acuerdo a la norma ASTM638 por el proceso de inyección. Previo al proceso anterior, los compuestos fueron secados en un horno tipo mufla a 70°C en promedio durante 12 hrs. Inmediatamente después, cada compuesto se vertió en la tolva para obtener 15 coladas de cada mezcla realizada.

MATERIAL COMPUESTO	Velocidad de inyección (mm/seg)	Presión de inyección (MPa)	Temperatura de salida (°C)	Presión posterior (MPa)	Temperatura de enfriamiento (°C)
HDPE 0%FN	75	140	190	70	12
HDPE 5%FN	75	140	190	70	12
HDPE 10%FN	75	140	190	70	12
HDPE 15%FN	75	140	190	70	12
HDPE 5%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	75	140	190	70	12
HDPE 10%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	75	140	190	70	12
HDPE 15%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	75	140	190	70	12
HDPE 15%FN EN CERA POLIMERICA	75	140	190	70	12
PP 0%FN	77	140	195	70	12
PP 5%FN	77	140	195	70	12
PP 10%FN	77	140	195	70	12
PP 15%FN	77	140	195	70	12
PP 5%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	77	140	195	70	12
PP 10%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	77	140	195	70	12
PP 15%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	77	140	195	70	12
PP 15%FN EN CERA POLIMERICA	77	140	195	70	12
PS 0%FN	80	150	205	75	12
PS 5%FN	80	150	205	75	12
PS 10%FN	80	150	205	75	12
PS 15%FN	80	150	205	75	12

**Tabla 3.1** En ésta se indica los parámetros de inyección utilizados para cada uno de los materiales compuestos.

MATERIAL COMPUESTO	t1 (°C)	t2 (°C)	t3 (°C)	t4 (°C)	t5 (°C)
HDPE 0%FN	160	170	175	185	190
HDPE 5%FN	160	170	175	185	190
HDPE 10%FN	160	170	175	185	190
HDPE 15%FN	165	170	175	185	190
HDPE 5%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	165	170	175	185	190
HDPE 10%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	160	170	175	185	190
HDPE 15%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	162	170	175	185	190
HDPE 15%FN EN CERA POLIMERICA	163	170	175	185	190
PP 0%FN	160	170	175	185	190
PP 5%FN	160	170	175	185	190
PP 10%FN	160	170	175	185	190
PP 15%FN	165	170	175	185	190
PP 5%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	165	170	175	185	190
PP 10%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	160	170	175	185	190
PP 15%FN TRAT. EN ACIDO MALEICO	162	170	175	185	190
PP 15%FN EN CERA POLIMERICA	163	170	175	185	190
PS 0%FN	120	125	130	135	145
PS 5%FN	120	125	130	135	145
PS 10%FN	125	125	130	135	145
PS 15%FN	130	125	130	135	145

**Tabla 3.2** En la tabla dos se muestran los perfiles de temperatura utilizados para cada composición en estudio.

En las inyectoras comerciales aproximadamente un 50% del calor requerido para fundir el material lo aporta la fricción viscosa, generada por el giro del tornillo con respecto al barril, y el otro 50% lo aportan las resistencias eléctricas.

Los parámetros del proceso de inyección se ajustaron de acuerdo a los tipos de materiales a estudiar y a la diversidad de composiciones que se manejaron durante la experimentación. El control de las características para todas las

muestras se llevó a cabo mediante el control del peso de cada serie de probetas (Figura 3.2), los defectos probables se controlaron también a través del control del peso de las probetas.



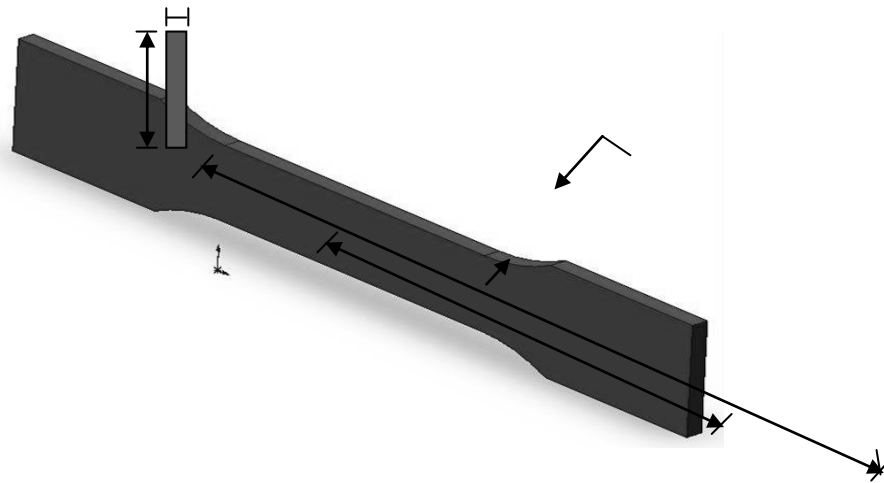
**Figura 3.2** Probetas inyectadas ASTM 638 de polipropileno al 15% de fibra de nopal.

En la figura 3.3 se muestra la máquina de inyección utilizada durante la fabricación de las probetas, esta máquina cuenta con un mecanismo de cierre hidráulico por pistón, que se contrapone de manera efectiva a la presión utilizada para la fabricación de las muestras.



**Figura 3.3** Inyectora utilizada marca DEMAG, ErgoTechPro 50-270, de 50 toneladas de fuerza de cierre.

La figura 3.4 muestra la forma y las dimensiones de la probeta utilizada para los ensayos de tracción de acuerdo a la norma ya mencionada.



**Figura 3.4** Dimensiones de las probetas requerida, para ensayos de tracción. Según la norma ASTM 638.

Una vez escrito lo anterior y obtenidas las probetas para cada una de las composiciones, se procedió a escoger las piezas adecuadas de cada grupo para seleccionar las probetas que en apariencia y peso fueran similares, con el propósito de buscar homogeneidad en los ensayos.

### 3.3 Ensayos mecánicos

Las pruebas de tracción se llevaron a cabo en una máquina universal marca Instron modelo TX220 utilizando una celda de carga de 5 kN, escala adecuada para materiales de baja resistencia como los plásticos. En ésta máquina se obtuvieron los datos de esfuerzo a la fluencia, deformación a la fluencia, esfuerzo a la ruptura, deformación a la ruptura y el módulo de Young o Módulo de Elasticidad del material en estudio.

Por otra parte se realizó la prueba de dureza, dicha prueba se llevo a cabo bajo normas ASTM D758 y que además fueron realizadas en el mismo laboratorio con un durómetro digital marca Mitutoyo que utiliza una escala Rockwell R.

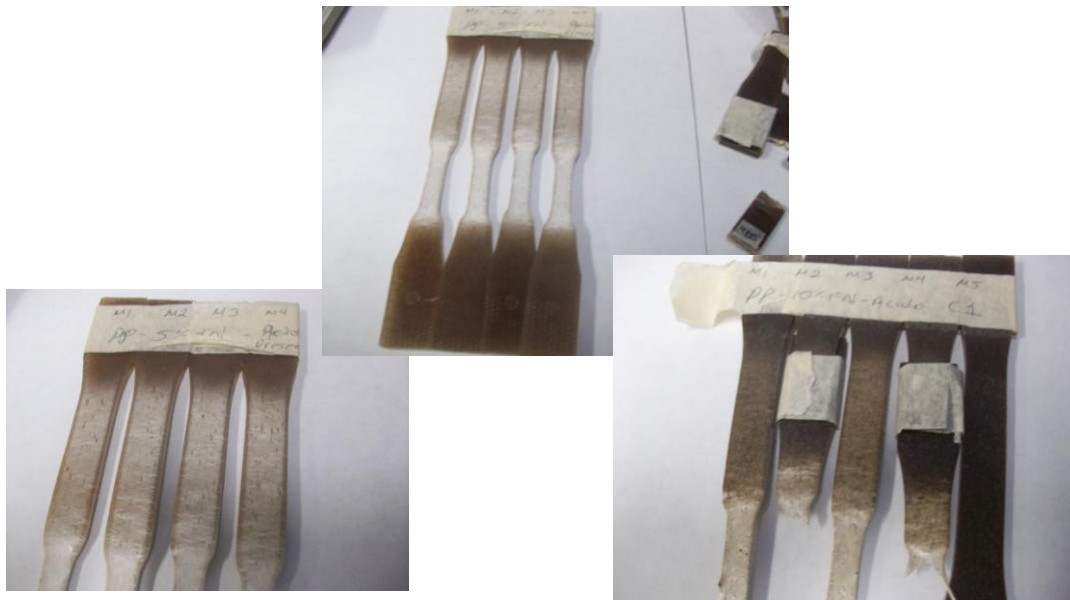
#### 3.3.1 Prueba de Tracción

Estas pruebas fueron realizadas conforme a las normas ASTM D-638, con ensayos de 5 muestras por cada compuesto establecido. La figura 3.5 muestra la maquina utilizada así como la prueba de carga propia de materiales ligeros.



**Figura 3.5** maquina instron Tx200 utilizada para los ensayos de tracción, y la celda de carga de 5kN.

En la figura 3.6 se muestran las probetas ensayadas de polietileno al 10% de bagazo de nopal sin tratamiento acoplante y polipropileno al 10% de bagazo de nopal con tratamiento acoplante de acido maleico.



**Figura 3.6** probetas ya expuestas al ensayo de tracción en la máquina instron, HDPE al 10% de Fibra de Nopal sin tratamiento acoplante y PP al 10% de fibra de nopal con tratamiento en acido maleico.

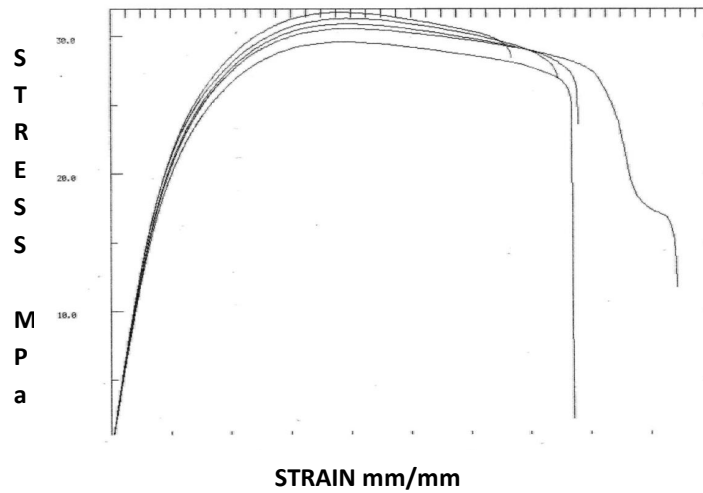
A continuación, en la tabla 3.1 se muestra el orden en que fueron sometidas las probetas a las pruebas de tracción, mostrando detalladamente los porcentajes y los tratamientos a los que fueron sometidos:

<b>MATERIAL % DE FIBRA DE NOPAL</b>
HDPE NATURAL
HDPE 5%FN
HDPE 10%FN
HDPE 15%FN
HDPE (ACIDO M.) 5%FN
HDPE (ACIDO M.) 10%FN
HDPE (ACIDO M.) 15%FN
HDPE (CERA P.) 15%
PP NATURAL
PP 5%FN
PP 10%FN
PP 15%FN
PP (ACIDO M.) 5%FN
PP (ACIDO M.) 10%FN
PP (ACIDO M.) 15%FN
PP (CERA P.) 15%FN
PS NATURAL
PS 5%FN
PS 10%FN
PS 15%FN

**Tabla 3.1** Orden de los materiales compuestos en que fueron realizados los ensayos de tracción.

Para cada uno de los materiales, se obtuvieron graficas de esfuerzo-deformación. Los datos obtenidos se conjuntaron en una sola grafica para comparar el comportamiento de los mismos con las probetas de referencia, es decir sin refuerzo. La figura 3.7 muestra una de las graficas obtenidas de la

maquina instron del compuesto de polipropileno al 5% de fibra de nopal sin tratamiento.



**Figura 3.7** Datos que son capturados por el computador de la máquina instron en el ensayo de tracción del compuesto polipropileno al 5% de fibra de nopal sin tratamiento.

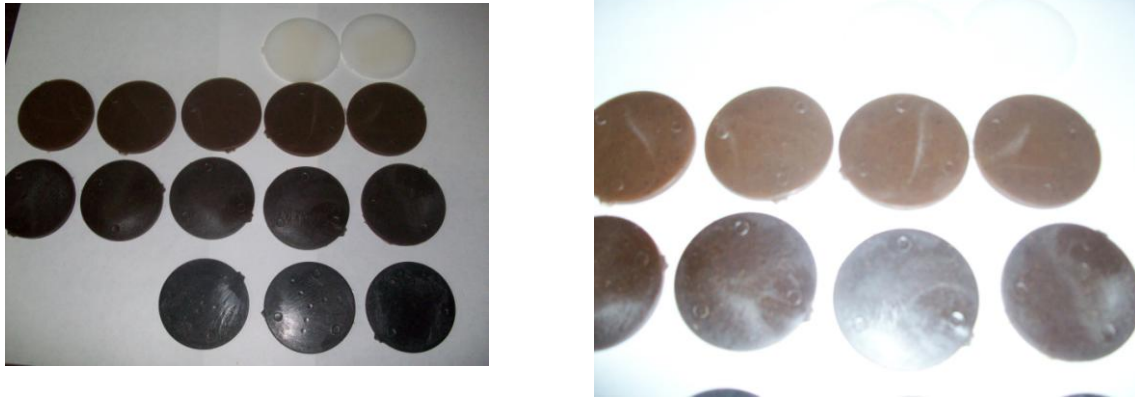
### 3.3.2 Ensayo de Dureza

Para los ensayos de dureza, se utilizó un Durómetro digital marca Mitutoyo, con el cual se midió el ensayo de dureza en Rockwell R utilizando una carga de 100Kg y un indentador de .25 pulg. para realizar el ensayo de dureza nos basamos en la norma ASTM D758. En la figura 8 se muestra el durómetro utilizado.



**Figura 3.8** Durómetro digital marca Mitutoyo.

Al igual que en los ensayos de tensión, las muestras fueron clasificadas en series de 5 y ensayadas de acuerdo a la norma descrita. La figura 3.9 muestra las probetas de dureza que fueron ensayadas de polipropileno sin refuerzo, polipropileno al 15% de fibra de nopal sin tratamiento acoplante y polietileno al 5% de fibra de nopal sin tratamiento acoplante.



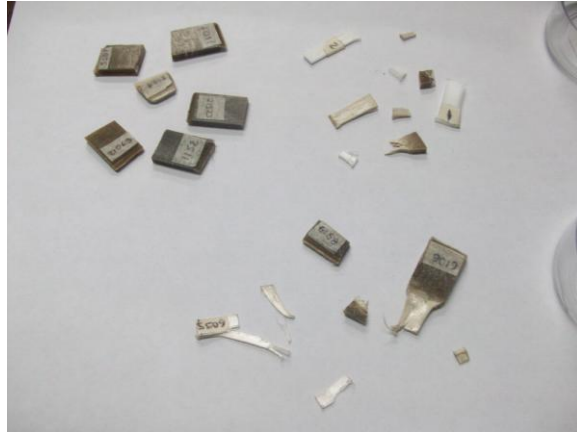
**Figura 3.9** Probetas utilizadas para el ensayo de dureza, PP sin refuerzo, PP al 15% de fibra de nopal sin tratamiento y HDPE al 5% de fibra de nopal sin tratamiento.

### 3.4 Microscopía Electrónica

El equipo utilizado para las observaciones bajo microscopio electrónico de barrido, fue un SEM marca PHILLIPS XL30 donde las observaciones realizadas fueron a 50X, 100X, 200X y 400X.

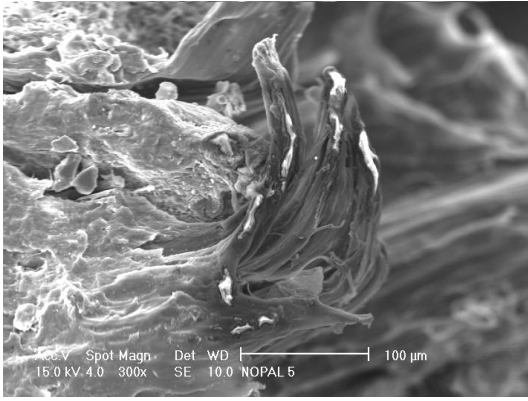
Para llevar a cabo dicha prueba fue necesario realizar algunos pasos anteriores a la observación, primeramente las piezas resultantes de la prueba de tracción fueron sometidas a bajas temperaturas por nitrógeno líquido, con el propósito de fracturar la muestra con mayor facilidad sin que afectara la morfología entre las fibras y la matriz, y poder observar a la muestra en dirección paralela a la fibra, después de haber pasado por este procedimiento, se realizó un recubrimiento de conducción por vacío a través de dispersión de partículas de oro. La figura 3.10 muestra el equipo utilizado para el recubrimiento de conducción. En la misma figura se observan las muestras fracturadas previas al recubrimiento de conducción aplicado.



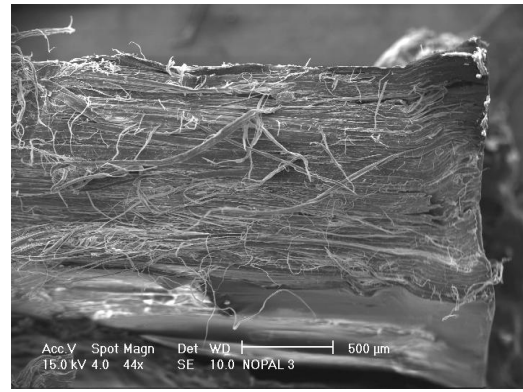


**Figura 3.10** proceso de recubrimiento de conducción, se utilizo un equipo en el cual se crea un vacio para poder lograr por medio de un voltaje una nube de electrones de oro.

Una vez logrado el baño en oro, procedimos a extraer las muestras y colocarlas en recipientes para su mejor clasificación. La observación al microscopio electrónico tuvo la finalidad d observar la unión entre la matriz y la fibra, durante esta etapa se pudieron observar grandes diferencias entre los materiales con tratamiento acoplante y sin el, tal como se analizara en el siguiente capítulo. La figura 3.11 es un ejemplo de las observaciones hechas en los diversos compuestos.



Muestra embebida



Muestra limpia

**Figura 3.11** Observación bajo el microscopio electrónico, a 300X y 50X para PP al 10% de fibra de nopal con tratamiento en cera polimérica y PP al 10% de fibra de nopal sin tratamiento, respectivamente.

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **4.1 PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS.**

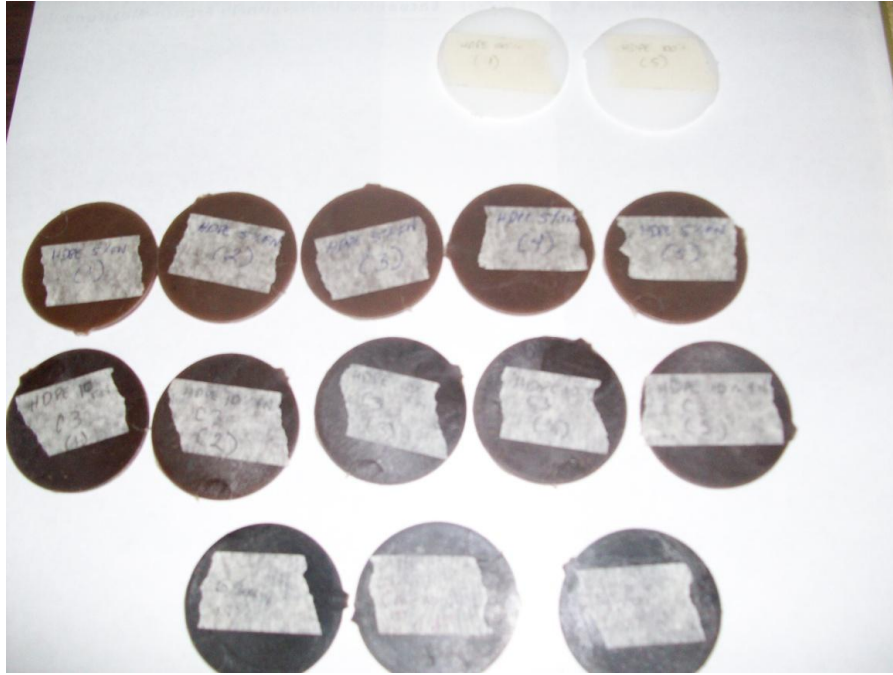
Como se recordará, durante el proceso de inyección, se prepararon muestras con 5 y 10% de fibra de nopal en cada una de las matrices, dado que se proporcionó en un inicio una mezcla total del 15% en cada matriz y con cada material base se fueron preparando las muestras. Encontramos en las primeras muestras inyectadas, la presencia de piezas incompletas y rebabas en algunas de ellas, entonces se procedió a controlar los parámetros del proceso, pensando en que la presión de inyección no era suficiente para ayudar a las fibras de bagazo a salir de la boquilla, aunado a esto, la velocidad de inyección también se revisó encontrándose un valor bajo por lo que el flujo efectivo de material no era suficiente, en algunas ocasiones fue necesario incrementar la presión posterior dese un valor de 650 (bar) hasta un valor de 800 (bar); sin embargo una vez obtenida la pieza con el exceso de material solo fue necesario ir disminuyendo paulatinamente dicha presión hasta llegar al punto de llenado óptimo.

Con las proporciones de 10 y 5% de fibra de nopal, no se hicieron modificaciones sustanciales en los parámetros de inyección, la temperatura fue el parámetro crítico pues a medida que se disminuía el % de fibra la temperatura se bajaba a razón de 3°C por porcentaje de fibra.

Previo a lo anterior, el material a inyectar se pre-seco a una temperatura de 70°C durante 12 hrs en un horno tipo estufa. Con esto se asegura minimizar las condiciones de humedad de los compuestos.

#### **4.1.1 Características Físicas de las Piezas**

De acuerdo a la inspección visual de las muestras, se observa un aumento considerable de la tonalidad y una mayor opacidad conforme el porcentaje de bagazo de nopal fue en aumento, las muestras presentaron una dispersión direccional de las fibras esto debido a que mantuvieron el patrón de trayectoria del flujo del proceso de inyección, como se observa en la figura 4.1, lo que es una característica de los compuestos reforzados con fibras y dicha distribución siempre tiende a aumentar las propiedades unidireccionalmente.



**Figura 4.1** Aumento considerable de la tonalidad y una mayor opacidad de las mismas conforme el porcentaje de Bagazo de Nopal fue en aumento. HDPE al 0, 5, 10 ,15% de fibra e nopal.

Durante la inyección, se consideró establecer un perfil de temperaturas de 160, 170, 180 y 190°C en el cañón, esto es debido a que después de los 200°C, el material se comenzaba a degradar.

El ciclo de inyección para cada uno de los materiales probados, fue satisfactorio; sin embargo, durante la inyección del poliestireno, por ser la matriz un material amorfo, se tuvieron problemas de piezas incompletas debido a la incapacidad del fundido para fluir; entonces se procedió a aumentar la velocidad de inyección y la presión provocando que el fundido generara material excedente. Desafortunadamente, esto no pudo controlarse y se decidió dejar el excedente para posteriormente eliminarlo de manera manual.

Una vez inyectadas todas las mezclas correspondientes, se procedió a realizar el ensayo de tracción, de dureza y la observación microscópica en cada mezcla, observándose que las muestras de matriz de poliestireno no presentaron características favorables para su estudio, como se verá más adelante. En cambio con las poleolefinas, se noto un cambio en las propiedades mecánicas no sustancial, al observar al microscopio electrónico se denotó que no se tenía la suficiente adherencia entre la matriz y la fibra por lo que se procedió a buscar un agente acoplante, usando así la cera polimérica y el ácido maleico. Los resultados de ambas observaciones se presentan en la sección de microscopía electrónica.

Se obtuvieron entre 10 y 15 juegos de probetas por cada compuesto. De las cuales se utilizaron sólo 6 probetas de tracción y 6 de dureza para cumplir con la norma, y obtener un valor promedio de los resultados, además de escoger las probetas con buen aspecto físico. Por los resultados obtenidos en las observaciones de la primera etapa de inyección, se decidió no seguir con el estudio de los compuestos con matriz poliestirénica.

Como se mencionó en el capítulo anterior, se realizaron tratamientos con ácido maleico y cera polimérica con el objetivo de encontrar en ellos el agente acoplante necesario para asegurar una buena unión entre el sustrato y las fibras, cambiar, estos tratamientos fueron realizados por el Centro de Investigación de Asistencia Técnica del Estado de Querétaro A.C. (CIATEQ). Dichos tratamientos mejoraron las propiedades mecánicas de los compuestos con matrices de polietileno de HD y polipropileno.

#### 4.1.2 Análisis de la prueba de Tracción

Las concentraciones de los compuestos ensayados respecto al volumen y el porcentaje se muestran en la tabla 4.1, nótese que ya se incluye las muestras que tuvieron el tratamiento de unión matriz-fibra.

Mezcla	Porcentaje en PESO (%)		Relación en volumen aparente	
	Polipropileno %	Fibra	Polipropileno	Fibra
1	100	0	1	0
2	95	5	2.9	1
3	90	10	1.37	1
4	85	15	0.86	1
Mezcla con tratamiento en Acido Malheico				
5	95	5	2.9	1
6	90	10	1.37	1
7	85	15	0.86	1

Mezcla con tratamiento en cera polimerica				
8	85	15	0.86	1
	Polietileno HD %	Fibra	Polietileno HD	Fibra
9		0	1	0
10		5	2.9	1
11		10	1.37	1
12		15	0.86	1
Mezcla con tratamiento en Acido Malheico				
13		5	2.9	1
14		10	1.37	1
15		15	0.86	1
Mezcla con tratamiento en cera polimerica				
16		15	0.86	1
	Poliestireno %	Fibra	Poliestireno	Fibra
17		0	1	0
18		5	2.9	1
19		10	1.37	1
20		15	0.86	1

**Tabla 4.1.** Relaciones polímero-fibra para las diferentes mezclas utilizadas.

Los resultados obtenidos para las pruebas de tracción fueron analizados mediante la interfase de la instron, estos se muestran a continuación tanto para el polipropileno (tabla 4.2), el polietileno HD (tabla 4.3) y el poliestireno (tabla 4.4).

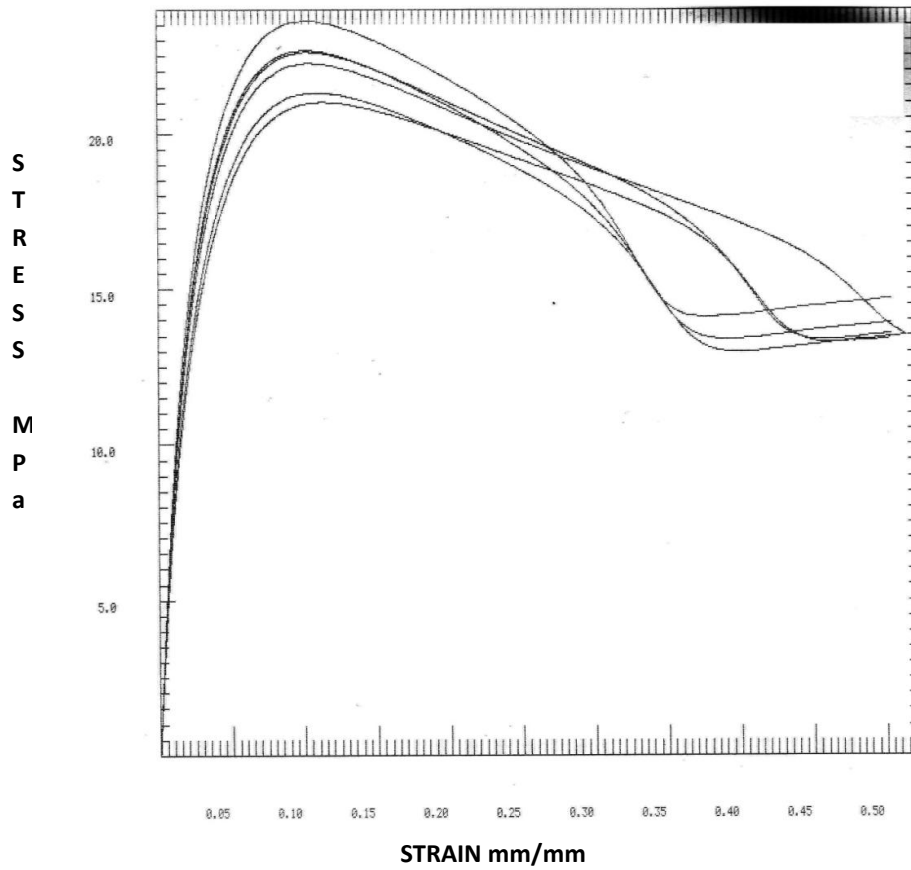
POLIPROPILENO	
Porcentaje de fibra [%]	Modulo de elasticidad E [Mpa]
0	1118
5	1369
10	1410
15	1428
5 AC. M	1128
10 AC. M	1220
15 AC. M	1456
15 C.P	1179
POLIETILENO DE HD	
0	965
5	1112
10	1128

15	1294
5 AC. M	999
10 AC. M	993
15 AC. M	1096
15 C.P	1231
<b>POLIESTIRENO</b>	
0	1118
5	1369
10	1410
15	1428

**Tabla 4.2.** Comportamiento del material compuesto respecto al modulo de elasticidad para polipropileno, polietileno HD y poliestireno.

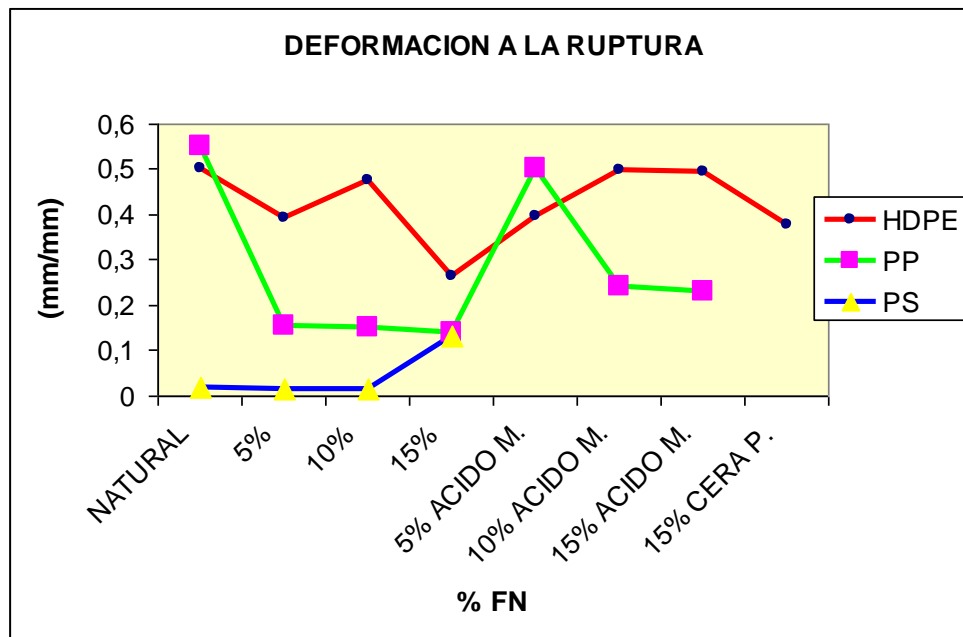
A continuación se muestran todas las gráficas obtenidas a través del ensayo de tracción llevado a cabo con una máquina Instron por lo que se pueden analizar y encontrar las características mecánicas de cada uno de los materiales compuestos.

En la siguiente figura (4.2) se muestra el resultado de las pruebas de tracción. En el apéndice A se muestran los resultados para cada compuesto estudiado. Partiendo de dichas graficas se procedió a realizar un análisis comparativo de propiedades conforme se incrementaba la cantidad de fibra para cada una de las matrices en estudio.



**Figura 4.2** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PEHD - 0% fibra

La gráfica 4.1 muestra los resultados de porcentaje de deformación a la ruptura con respecto a la proporción de fibra de nopal.

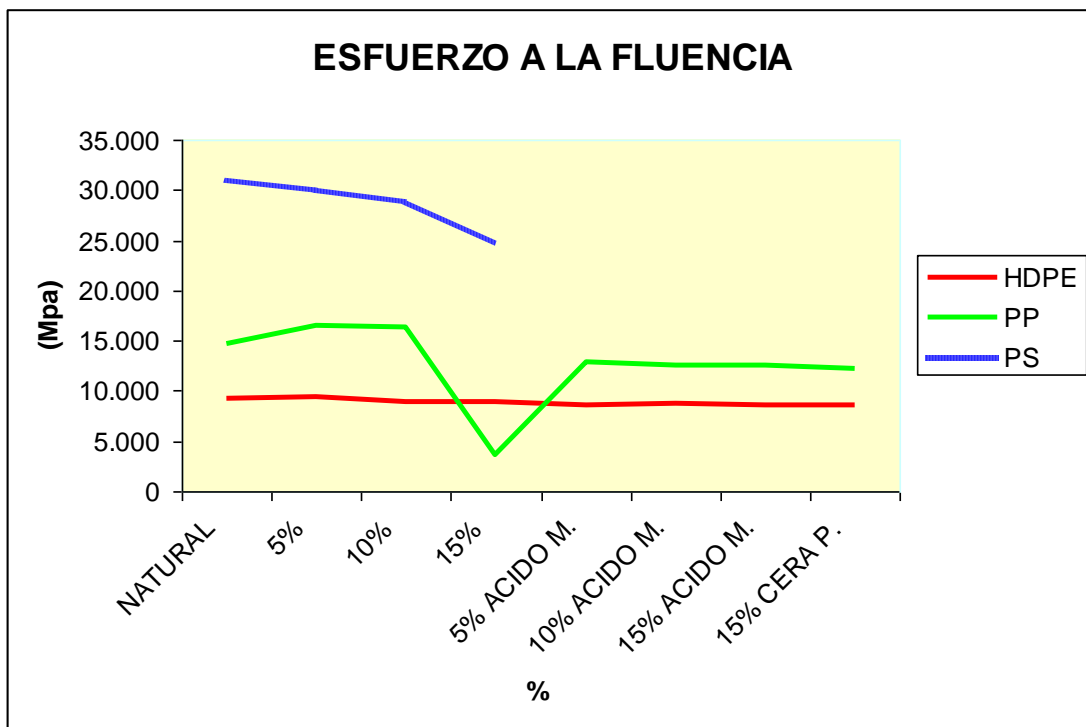


**Gráfica 4.1** Deformación a la ruptura.



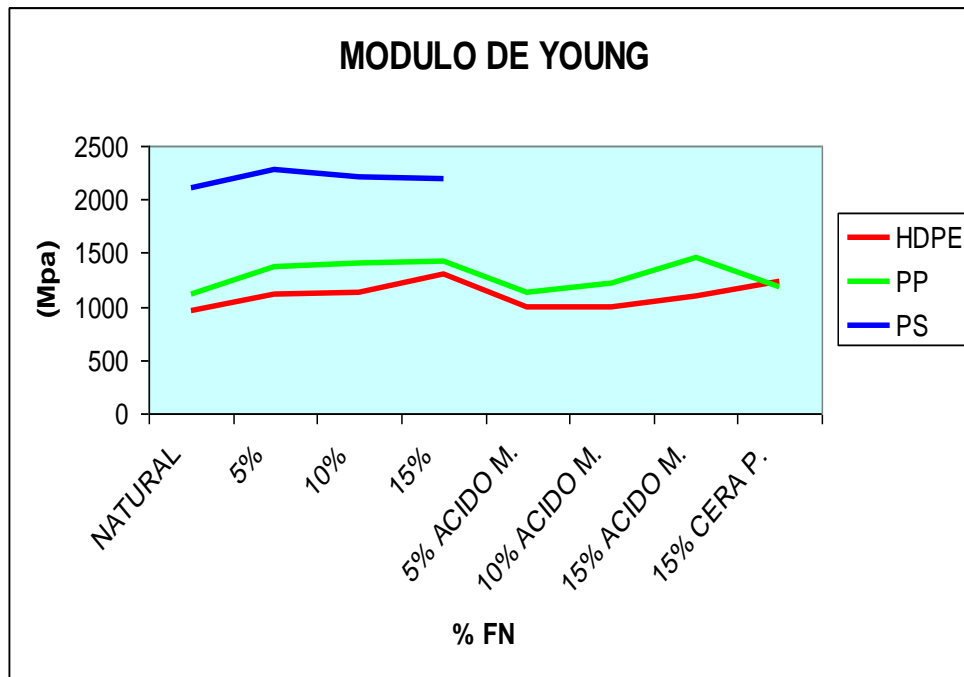
Como puede apreciarse la deformación del compuesto con matriz de polietileno casi se mantiene constante en comparación con las otras dos matrices. En el caso de la matriz de polipropileno se presenta un comportamiento constante al 5, 10 y 15% de fibra tanto con tratamiento como sin tratamiento, sin embargo, los compuestos que si llevan tratamiento presentan una deformación mayor constante en comparación con los compuestos sin tratamiento.

En la grafica 4.2, en la matriz de polietileno se observan cambios abruptos y el poliestireno muestra un ligero incremento, esto es en parte debido a que el esfuerzo a la fluencia disminuye después del 5% de concentración de fibra de nopal. Llama la atención que se presente un ligero descenso en el esfuerzo fluencia en el poliestireno, que coincide con un ligero incremento de la deformación a la ruptura antes de disminuir nuevamente con el porcentaje de fibra.



**Gráfica 4.2** Esfuerzo a la fluencia

Sin embargo, la gráfica 4.3 muestra la presencia un incremento del Módulo de Elasticidad conforme se incrementa el porcentaje de fibras dentro de los compuestos, proporcionando mayor rigidez al material.



**Gráfica 4.3** Comportamiento del Módulo de Elasticidad (MPa) vs Porcentaje de fibras (%).

Este comportamiento es explicable si se toma en cuenta que las fibras adquieren una orientación determinada por el proceso de inyección. Por otro lado, debe tomarse en cuenta que al no existir una adherencia adecuada entre fibra y matriz, al llegar un límite de saturación de fibras, las propiedades del material disminuirán, debido a que la matriz no transmite la fuerza necesaria a las fibras, por lo que existe la disminución de esfuerzos.

#### 4.1.3 Resultados y Análisis del Ensayo de Dureza.

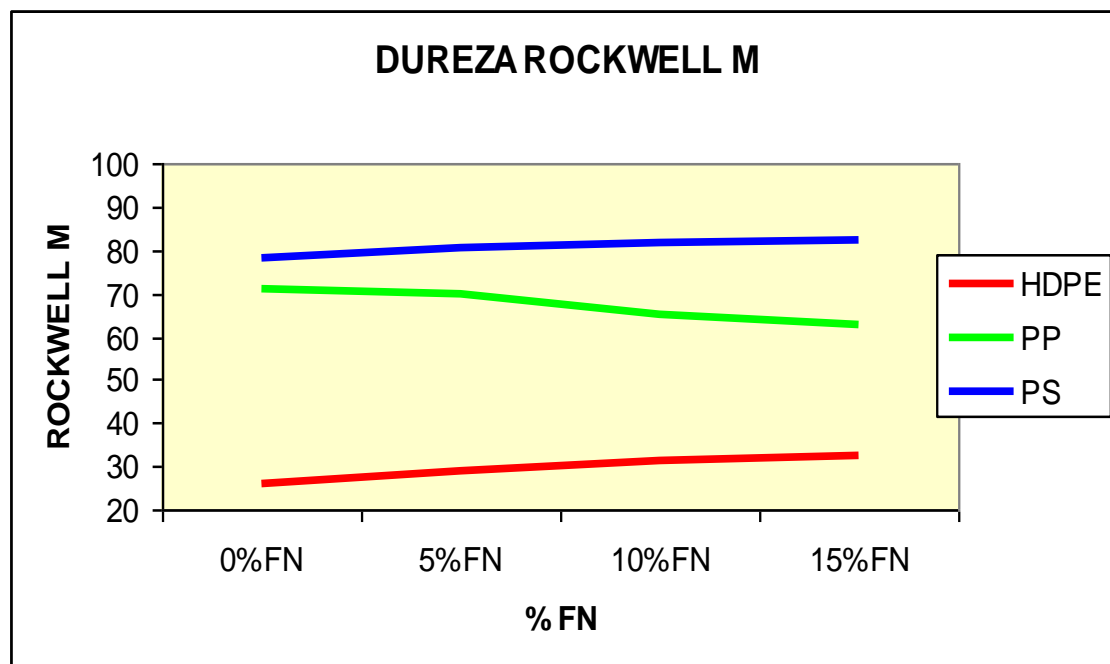
La prueba de dureza realizada fue de acuerdo a la norma ASTM D-785 en Rockwell M. En el desarrollo de las pruebas de dureza se utilizó un durómetro digital Marca Mitutoyo, el ensayo se elaboró bajo las condiciones especificadas en la norma ASTM D-785, obteniéndose los resultados presentados en la tabla 4.5.

ENSAYO DE DUREZA PARA POLIPROPILENO	
PORCENTAJE DE FIBRAS	DUREZA HRM
0	70.7
5	69.6
10	64.8
15	62.8
ENSAYO DE DUREZA PARA POLIETILENO HD	
0	26.2

5	28.8
10	31.1
15	32.5
<b>ENSAYO DE DUREZA PARA POLIESTIRENO</b>	
0	78.1
5	80.4
10	81.7
15	82.4

**Tabla 4.5** Valores obtenidos del ensayo de Dureza.

Se puede apreciar que existe una tendencia determinada sobre la dureza del material, para el polietileno HD y poliestireno, hay un incremento para esta propiedad mientras que para el polipropileno observamos una disminución de esta propiedad conforme la proporción de fibras va en aumento hasta valores del 62.8 HRM para el 15% de fibras.



**Gráfica 4.4** Valores de dureza obtenidos para el compuesto de la técnica 1.

Este comportamiento es el resultado del agrupamiento de fibras en ciertos sectores del material, originando que aquellas zonas que contenían menor cantidad de fibra presentaran menores índices de dureza aunque no se puede decir lo mismo para el polipropileno que fue en incremento, y por el contrario en las regiones que existían mayor cantidad de fibras la dureza resultara con valores mucho más altos.

Algo importante de destacar es que a pesar de estos comportamientos, haciendo una comparación con los valores de dureza para el material virgen (85-95R [6]), esta propiedad aumenta e incluso puede considerarse aceptable para cualquier proceso convencional para plásticos.

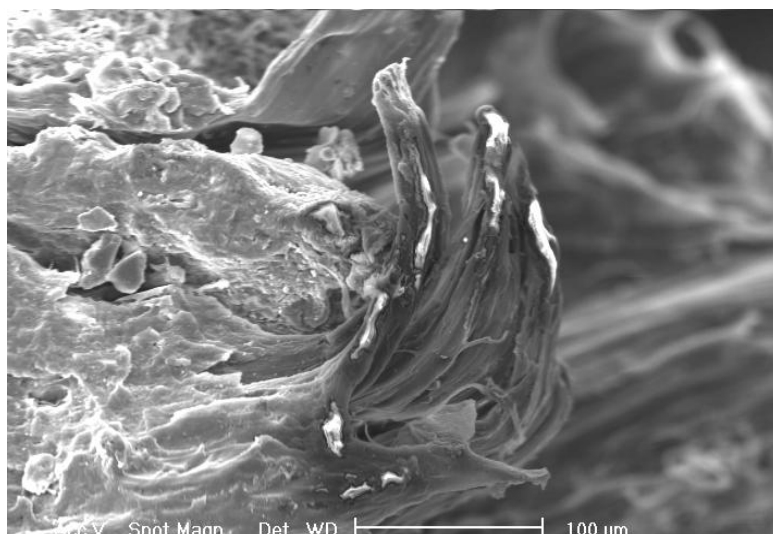
#### 4.1.4 Microscopia Electrónica.

Como se mencionó anteriormente la finalidad de observar algunas muestras en el microscopio electrónico radicó en verificar la adherencia y/o unión entre los constituyentes del compuesto, aquí se elaboró un análisis respecto a los porcentajes de ambos procesos de lo cual se obtuvo la siguiente información.

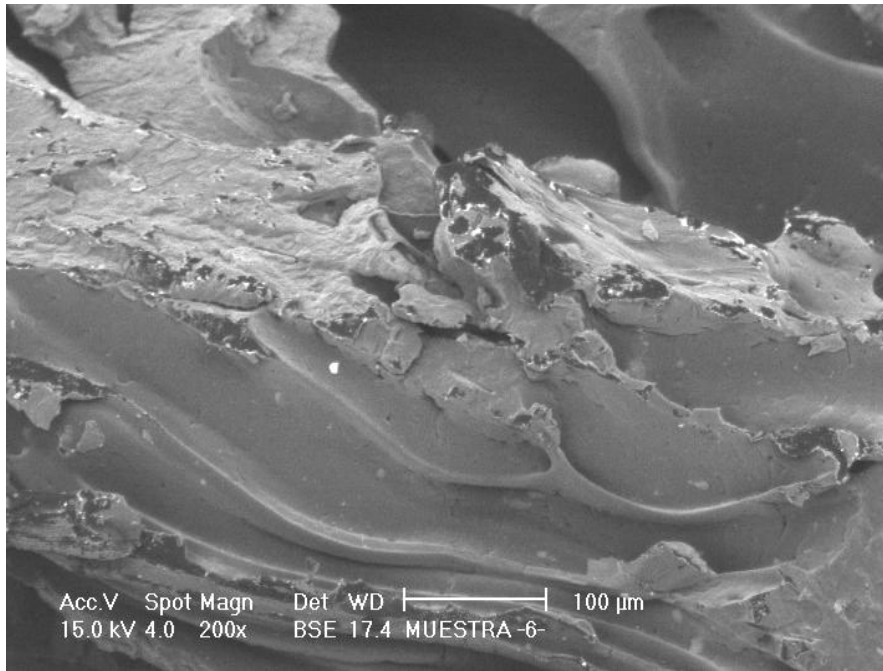
En la verificación óptica de las probetas inyectadas obtenida se observó una adecuada dispersión de las fibras. Para ello se tomaron muestras de cada una de las concentraciones y se partieron a la mitad. Los cortes se realizaron introduciendo a las piezas en nitrógeno líquido y posterior a esto cortar la pieza en forma paralela y transversal al flujo de inyección, con el propósito de examinar en el microscopio la adherencia de las fibras al plástico en ambas direcciones.

El equipo utilizado para las observaciones bajo microscopio electrónico de barrido, fue un SEM marca PHILLIPS XL30 donde las observaciones realizadas fueron a 50X, 100X, 200X y 400X, como se muestra en las figuras precedentes..

En el corte en dirección al flujo (figura 4.3) se pueden ver las fibras de perfil y se aprecia cómo las fibras se encuentran bien cubiertas por la matriz de plástico, en esta se puede llegar a la conclusión de que se encuentra embebida en la matriz como se puede observar en la figura. En este sentido, se pudo observar la unión entre la matriz y la fibra, donde se observó que los materiales que no presentaban tratamiento previo la fibra aparecía limpia (figura 4.4).



**Figura 4.3** Fibras largas en dirección al flujo. Fotografía de microscopia electrónica de barrido del polipropileno al 10% de Fibra de Nopal sin tratamiento. Observación a 300X con electrones retrodispersos.

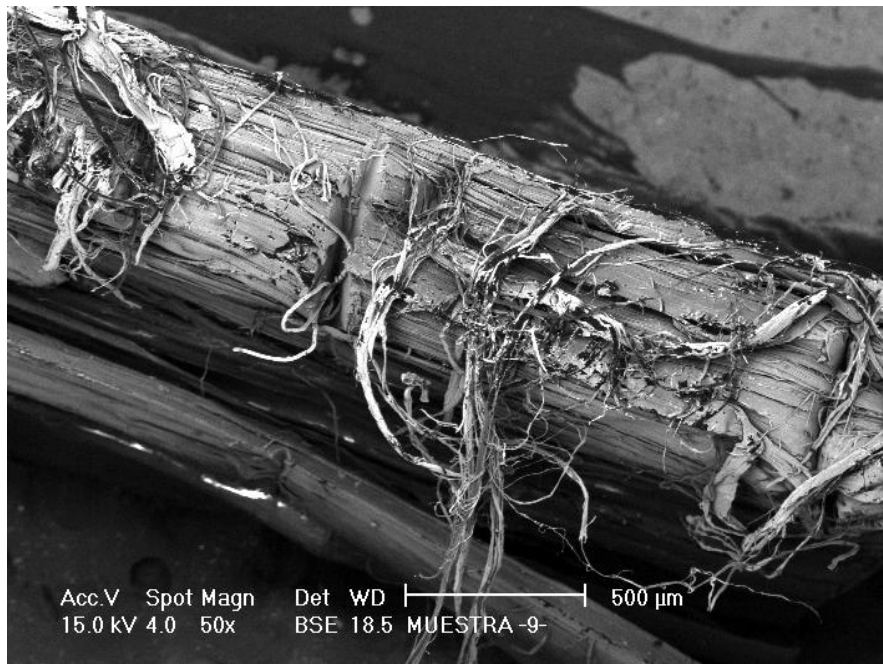


**Figura 4.4** Muestra limpia, solo hay marcas de la fibra, no está embebida en la matriz. La observación corresponde a polipropileno al 15% de fibra de nopal sin tratamiento. Visto a 200X con electrones secundarios.

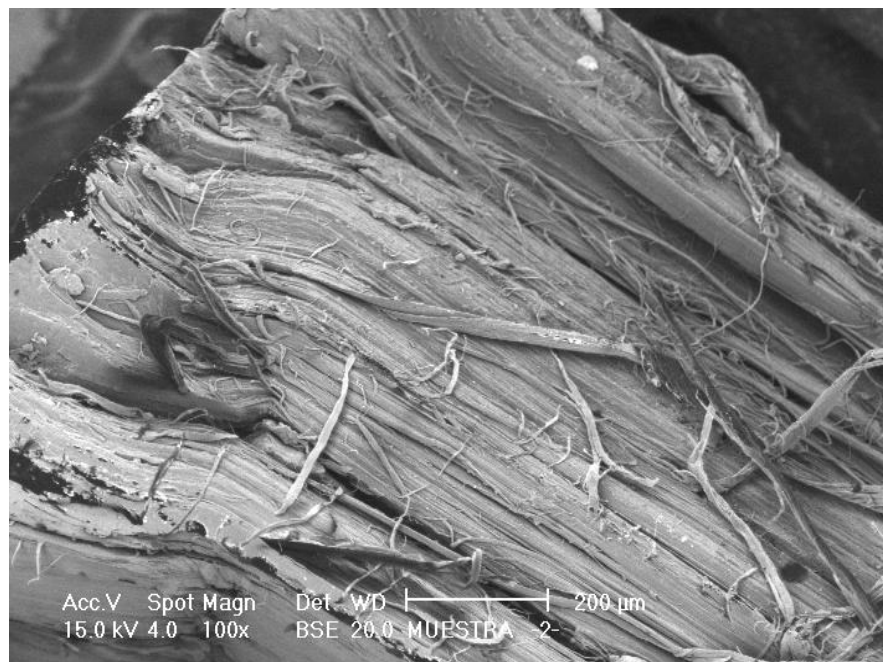
En lo que respecta a la adherencia entre fibra y matriz, se tiene que, si bien las mostradas en la figura 4.3 se encuentran cubiertas por el plástico, no tienen un anclaje fuerte, lo que se refleja en la presencia de fibras arrancadas y huecos en la matriz sin remanentes de refuerzo o plástico respectivamente [2]. Esto se aprecia en las figuras 4.4.

El tamaño de la partícula utilizada de la fibra fue aproximadamente de 548.6  $\mu\text{m}$ , medida obtenida de la distribución entre los tamices 30, 40, 60, y 80 del análisis granulométrico y por microscopía óptica.

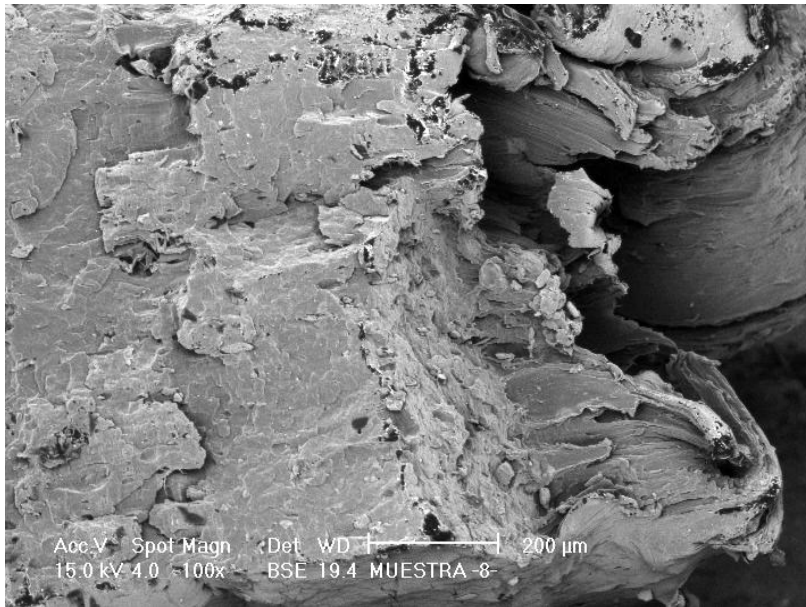
En la figura 4.5 se puede ver claramente la fibra del bagazo saliendo limpia de la superficie de fractura, presentando una zona oscura entre la fibra y la matriz en su intersección. En la figura 4.6 se vuelve a observar el paquete de fibras no deseable. Si bien el refuerzo se ha tratado como fibras, en las observaciones microscópicas se puede apreciar la presencia de estos paquetes de fibras, esto provoca que la fibra actúe más como una carga que como un refuerzo. En la figura 4.7 y 4.8 se aprecia una fibra corriendo de forma paralela a la fractura, quedando su superficie embebida en el polímero. Esto refleja claramente la buena adherencia entre el polímero y el bagazo de fibra de nopal, así como la mejor interacción mecánica adecuada entre fibra y matriz.



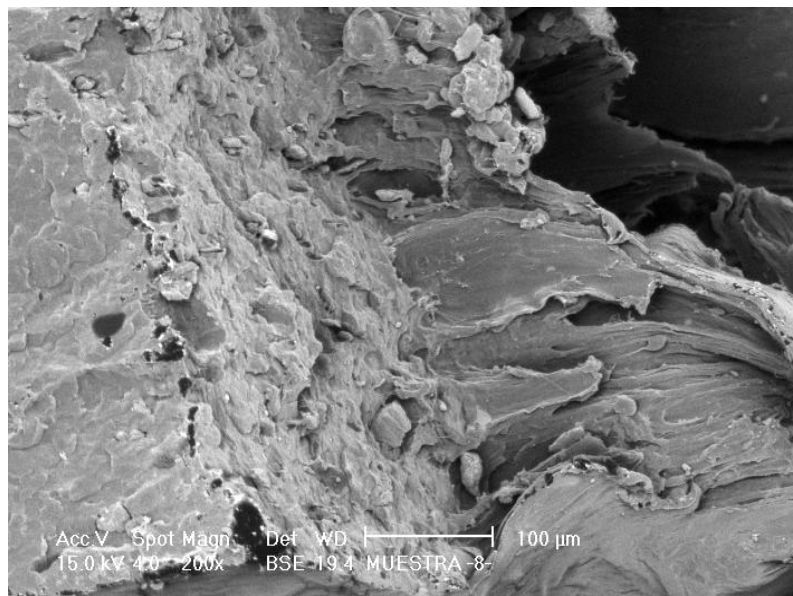
**Figura 4.5** Fibra en la zona de fractura. Resalta la falta de adherencia. La observación corresponde a polietileno de alta densidad al 10% de fibra de nopal con tratamiento en ácido maleico. Resolución a 100X



**Figura 4.6** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, estas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 15% de FN con tratamiento en ácido maleico. Resolución a 100X



**Figura 4.7** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia una fibra corriendo de forma paralela a la fractura, quedando su superficie embebida en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 15% FN con tratamiento en cera polimérica. Resolución a 100X



**Figura 4.8** Misma que la figura 7 pero con una resolución a 200X para una mayor observación de lo mencionado.

Como era de esperarse, las fibras se alinean según la dirección del flujo. Dado que el proceso de inyección implica un grado relativamente alto de cizalla en el material, estos esfuerzos hacen que las fibras se alineen, intentando adoptar

la forma de la trayectoria del fundido, creando tensiones en su interior las que irán disminuyendo con menores tamaños de fibra.



## CONCLUSIONES

La inclusión de fibras naturales de bagazo de nopal en materiales termoplásticos moldeados se pudo llevar a cabo por medio del proceso de inyección, tanto para el polietileno, como para el polipropileno e incluso para el poliestireno; sin embargo, el poliestireno, por ser un material frágil, era de esperarse que el refuerzo no tuviera buena respuesta al mejoramiento de sus propiedades. En éste trabajo, se tuvo un mejoramiento en cuanto a los procesos de secado, de mezclado e inyección, comparados con los trabajos precedentes a este, obteniendo así una mejor dispersión de las fibras como refuerzo en la matriz.

Cuando se trabajó con las matrices de polietileno y polipropileno, se notó una disminución de las propiedades mecánicas por la ausencia de acoplamiento entre estas matrices y la fibra de nopal.

A pesar de que la resistencia mecánica disminuyó, se observó que por la presencia de las fibras existía un ligero aumento en la rigidez del compuesto y que la dureza de éste ligeramente también aumentaba. Después de haber aplicado el tratamiento de cera polimérica se logró una mayor adherencia entre el refuerzo y la matriz, viéndose reflejado esto en el aumento de resistencia mecánica, debido al trabajo en conjunto de las partes.

## CONCLUSIONES

La inclusión de fibras naturales de bagazo de nopal en materiales termoplásticos moldeados se pudo llevar a cabo por medio del proceso de inyección, tanto para el polietileno, como para el polipropileno e incluso para el poliestireno; sin embargo, el poliestireno, por ser un material frágil, era de esperarse que el refuerzo no tuviera buena respuesta al mejoramiento de sus propiedades. En éste trabajo, se tuvo un mejoramiento en cuanto a los procesos de secado, de mezclado e inyección, comparados con los trabajos precedentes a este, obteniendo así una mejor dispersión de las fibras como refuerzo en la matriz.

Cuando se trabajó con las matrices de polietileno y polipropileno, se notó una disminución de las propiedades mecánicas por la ausencia de acoplamiento entre estas matrices y la fibra de nopal.

A pesar de que la resistencia mecánica disminuyó, se observó que por la presencia de las fibras existía un ligero aumento en la rigidez del compuesto y que la dureza de éste ligeramente también aumentaba. Después de haber aplicado el tratamiento de cera polimérica se logró una mayor adherencia entre el refuerzo y la matriz, viéndose reflejado esto en el aumento de resistencia mecánica, debido al trabajo en conjunto de las partes.

## **TRABAJOS A FUTURO**

Como material compuesto con fibras naturales, es indispensable seguir este trabajo midiendo la biodegradabilidad del compuesto. Se sabe que la degradabilidad de la matriz puede ser acelerada incluyendo compuestos del tipo oxidantes, por lo que otra rama de esta investigación sería trabajar con la combinación del compuesto y este tercer componente.

El bagazo de fibra de nopal, se puede embeber en una matriz del tipo natural, como alguno de los almidones ya estudiados, con el propósito de obtener un compuesto no derivado del petróleo. De esta manera se obtendrían las propiedades mecánicas con el procedimiento mostrado en este trabajo.

La búsqueda de mas agentes acoplantes pueden ayudar a mejorar la unión entre las diversas matrices con la fibra de nopal.

APENDICE

APENDICE A.

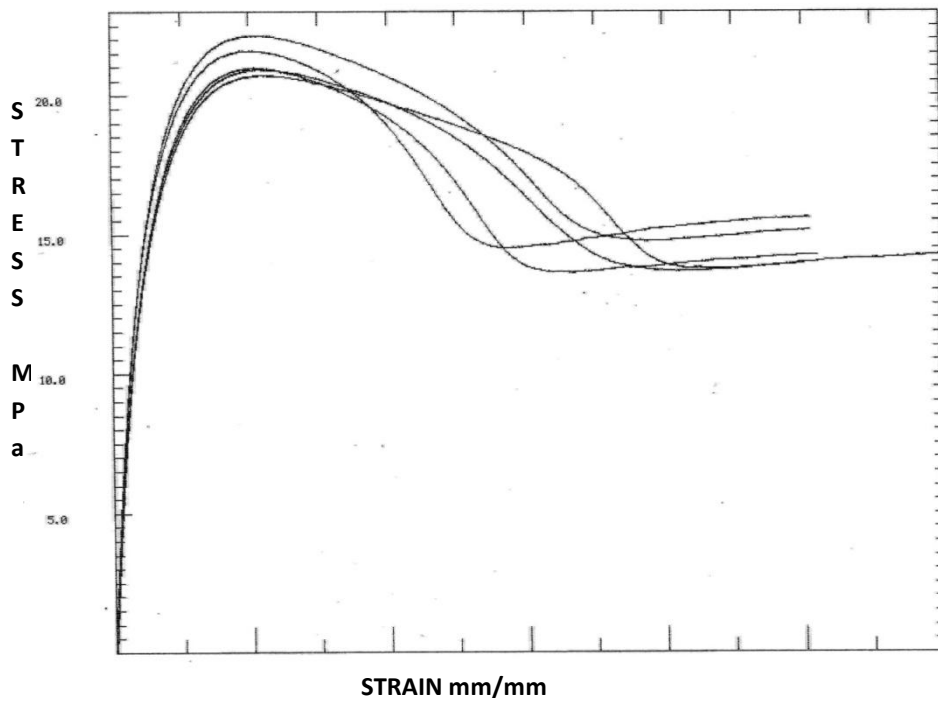


Fig 4.3. Análisis del ensayo de tracción del compuesto PEHD – 5% fibra

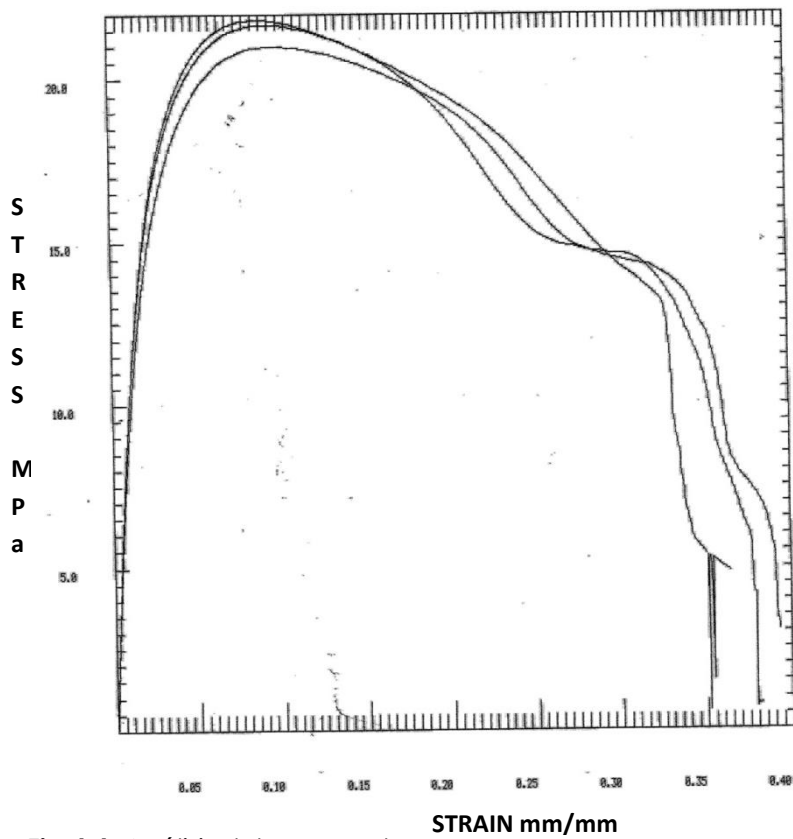
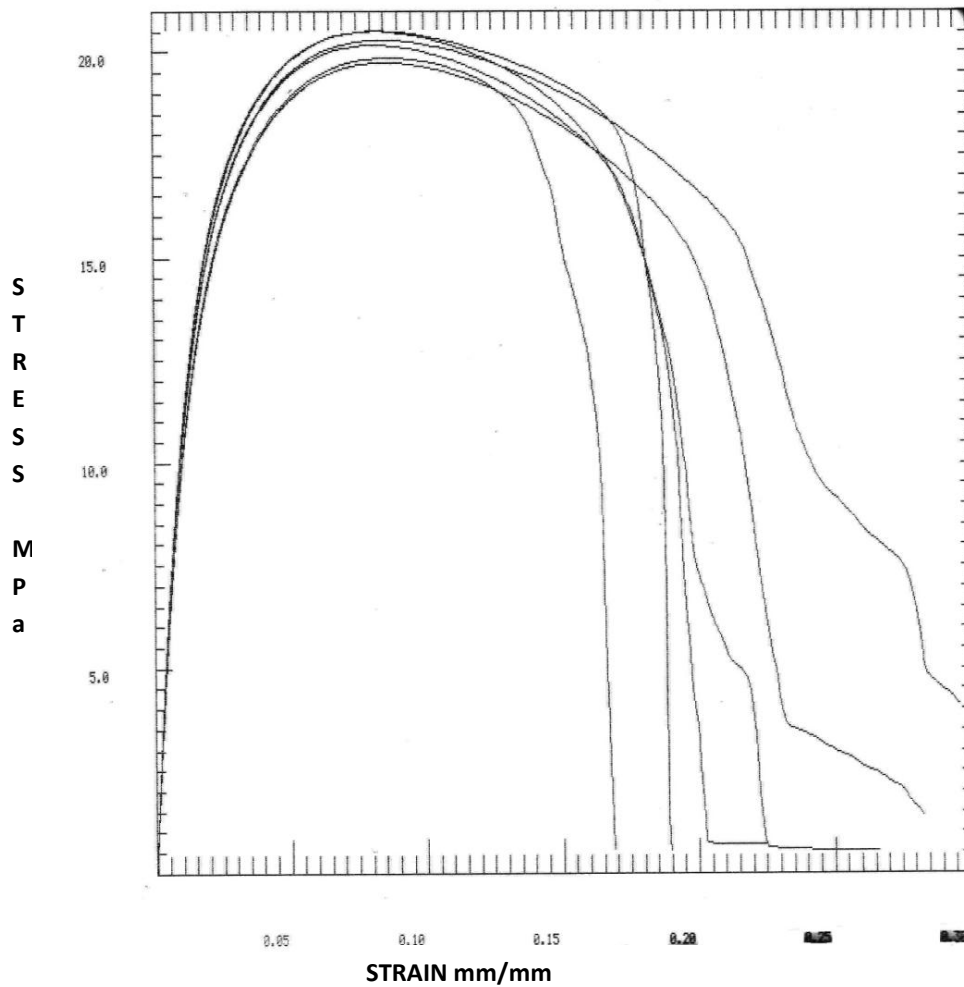
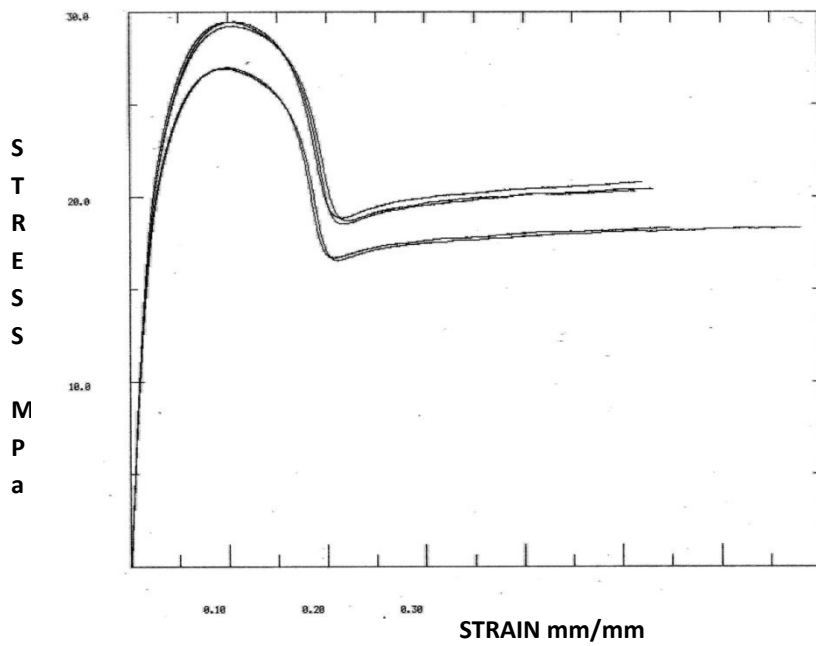


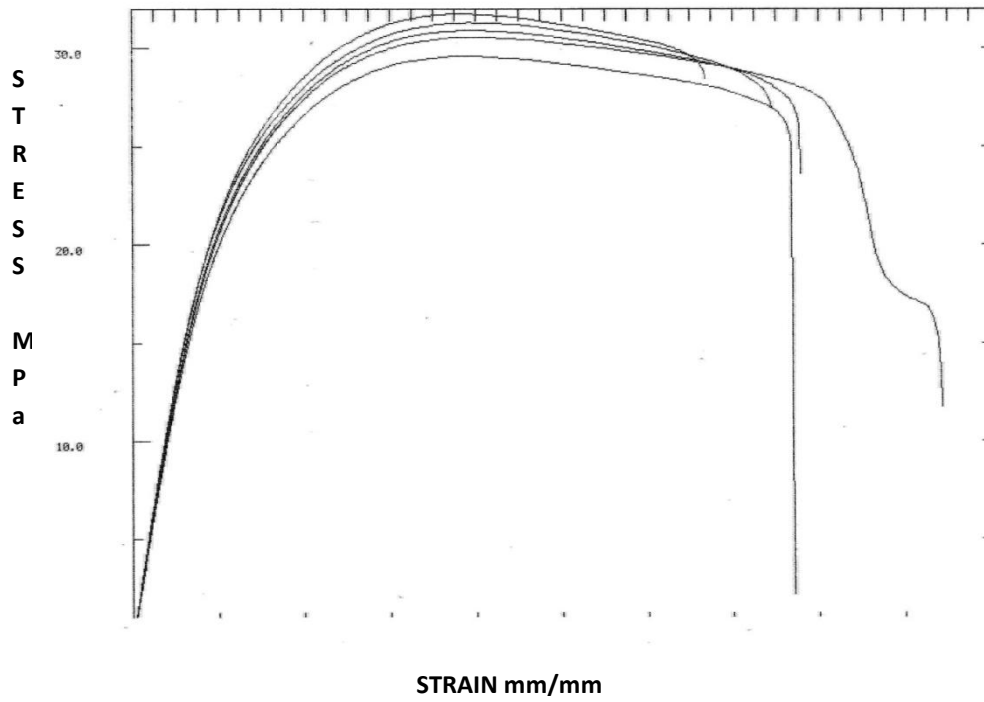
Fig 4.4. Análisis del ensayo de tracción del compuesto PEHD – 10% fibra



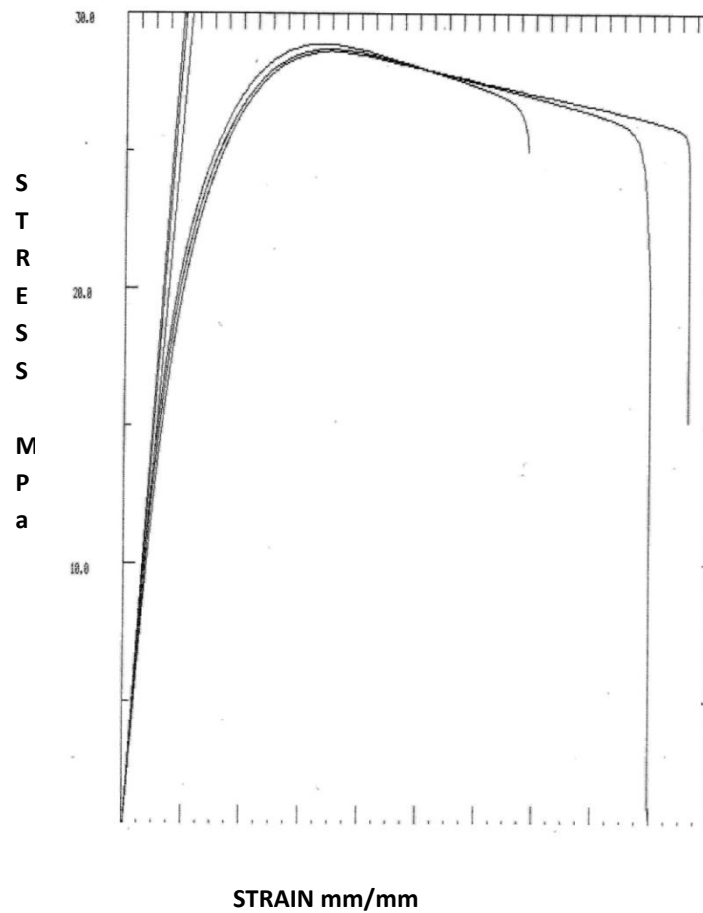
**Fig 4.5.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PEHD -15% fibra



**Fig 4.6.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PP - 0% fibra



**Fig 4.7.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PP – 5% fibra



**Fig 4.8.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PP – 10% fibra

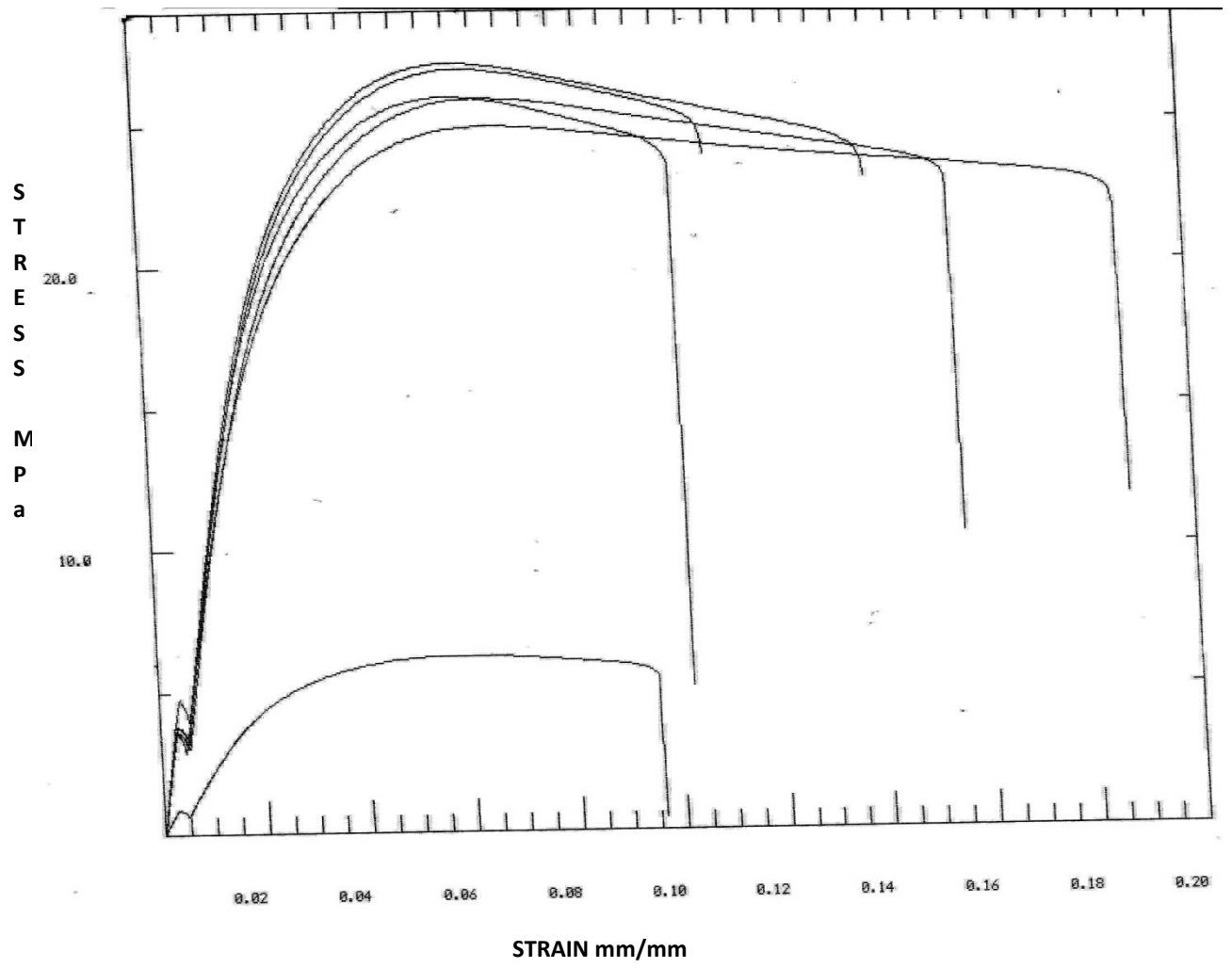
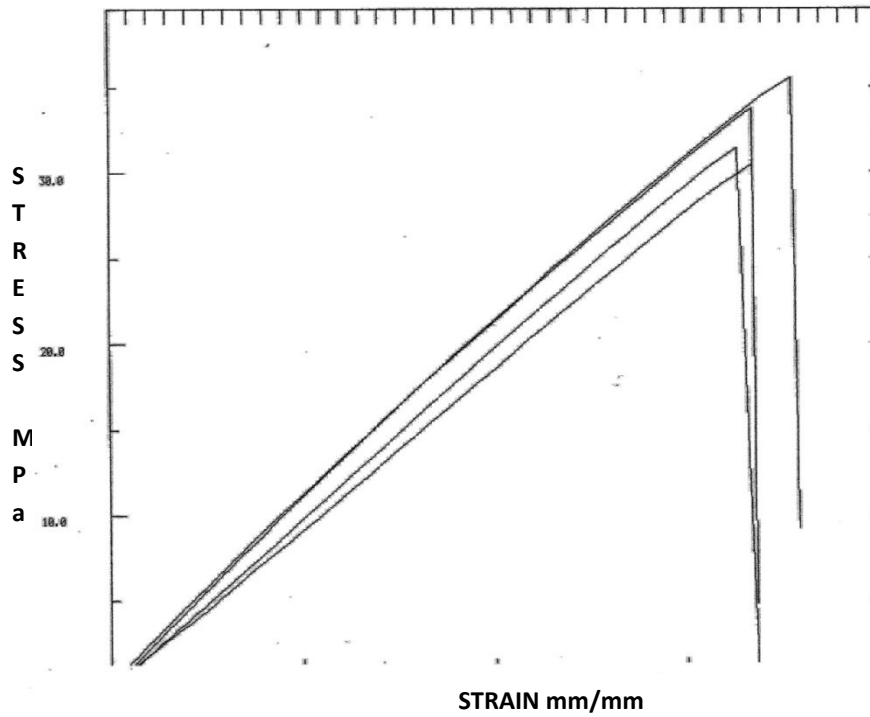
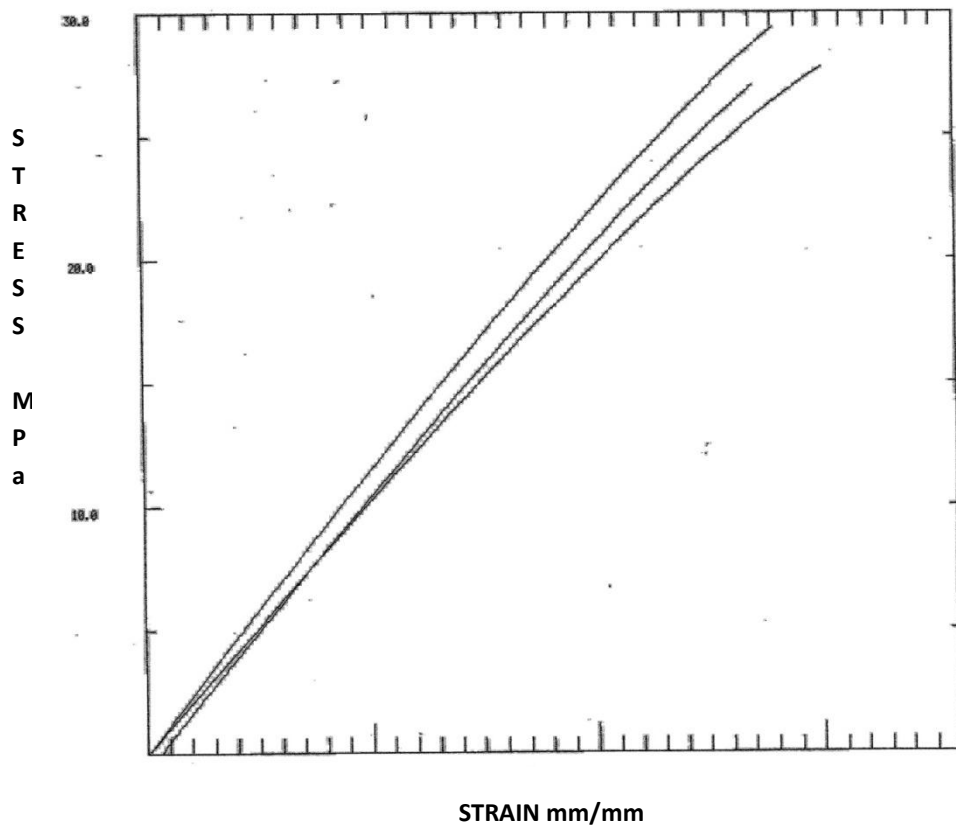


Fig 4.9. Análisis del ensayo de tracción del compuesto PP – 15% fibra

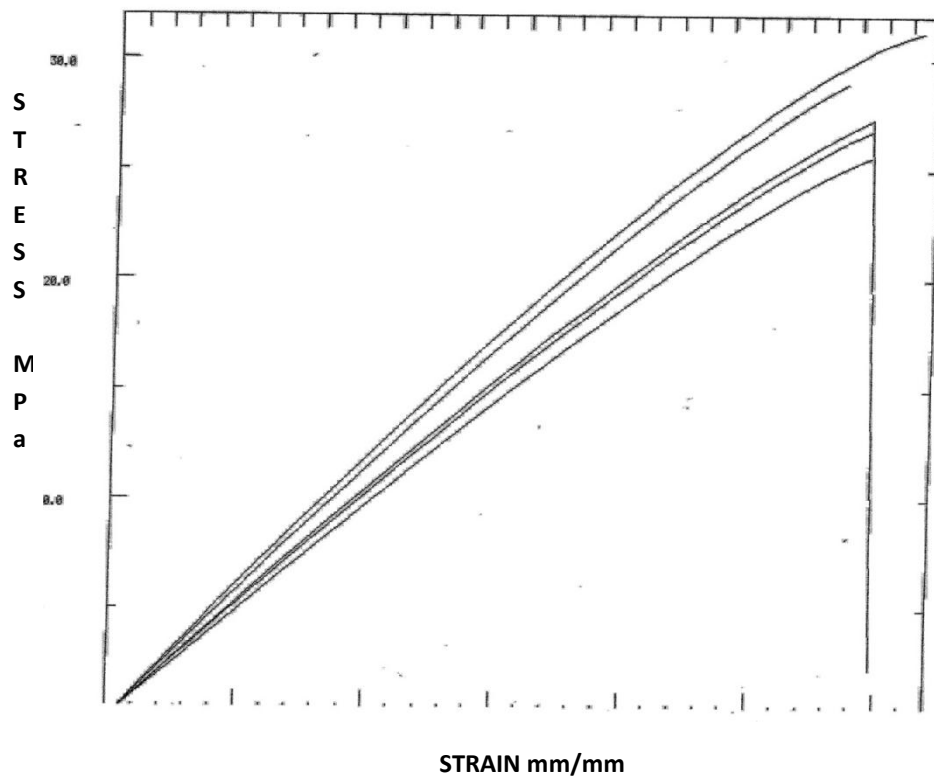


**Fig 4.10.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PGGs – 0% fibra

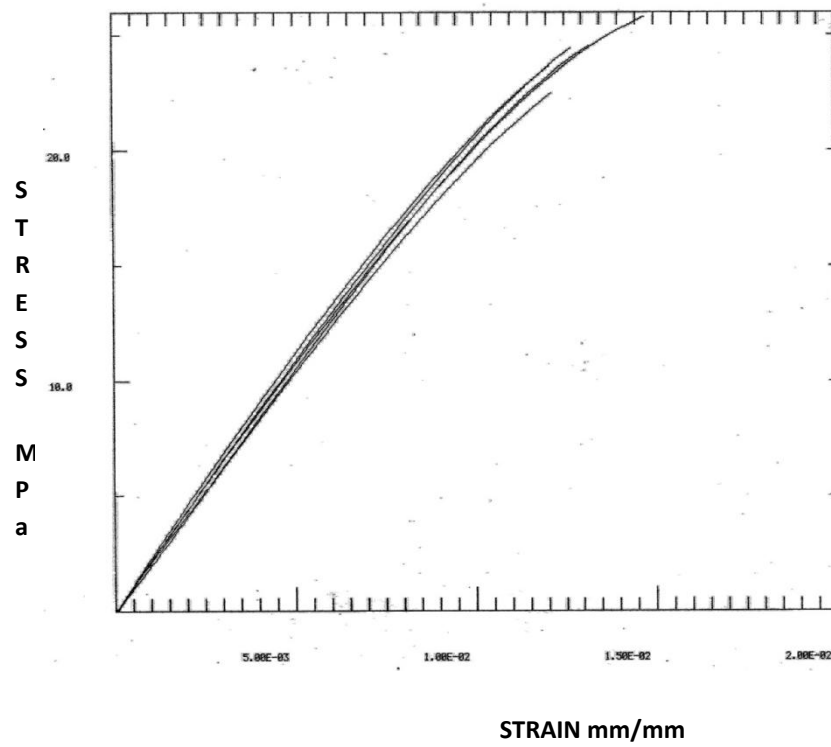


**Fig 4.11.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PGGs – 5% fibra

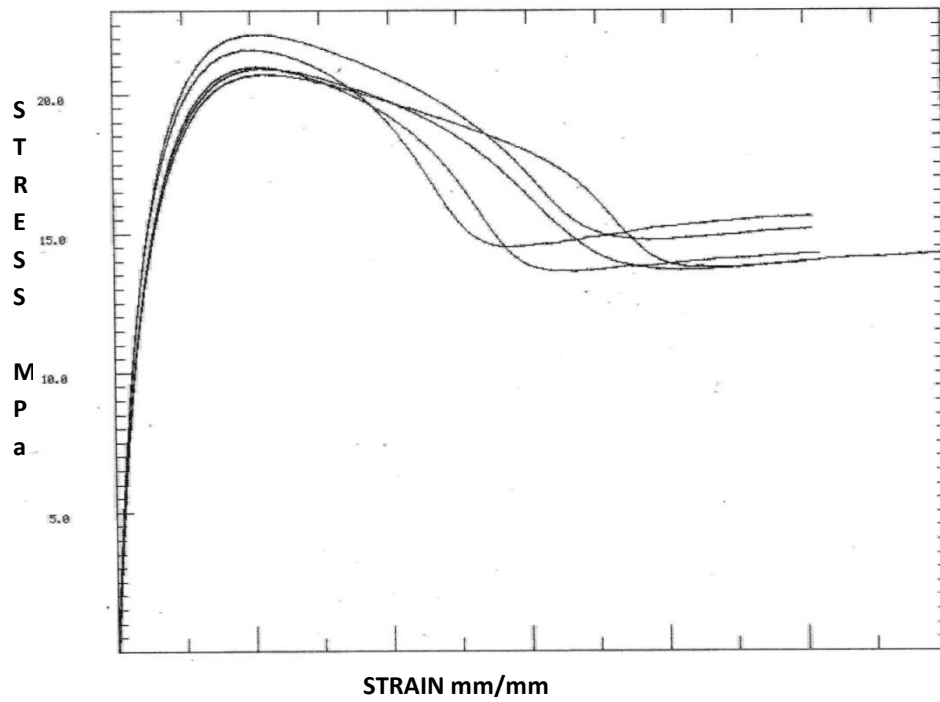




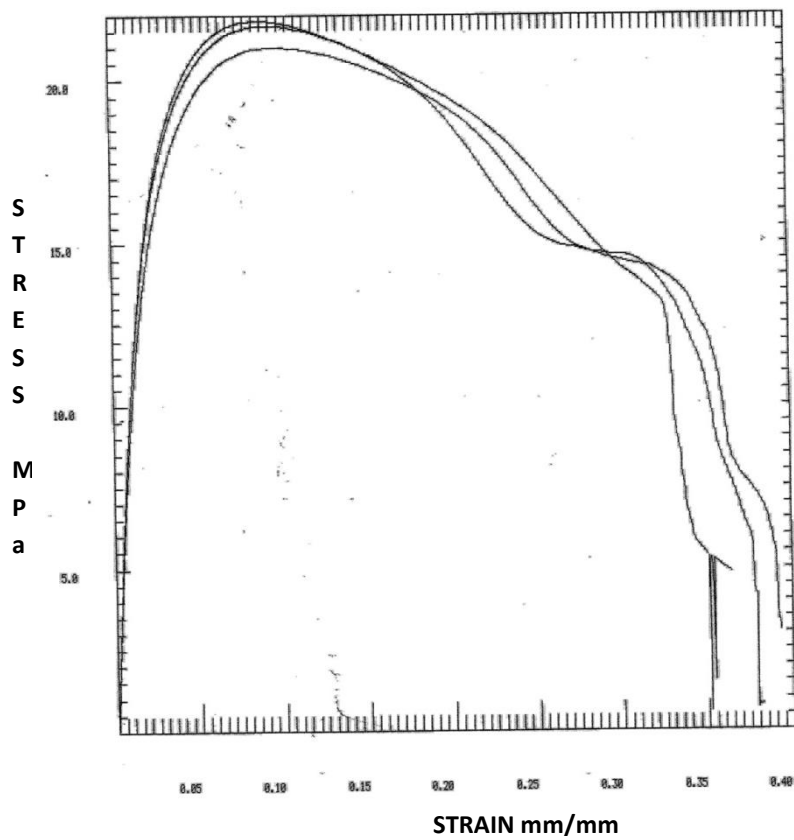
**Fig 4.12.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PGGs – 10% fibra



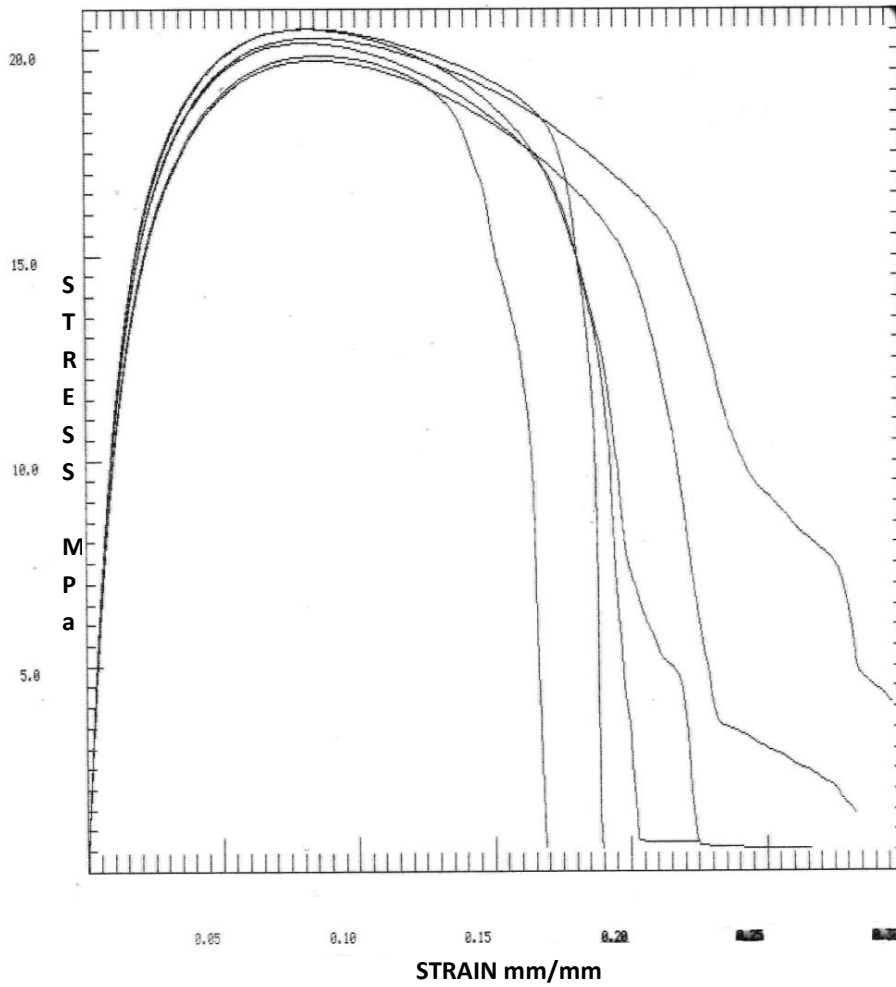
**Fig 4.13.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PGGs – 15% fibra



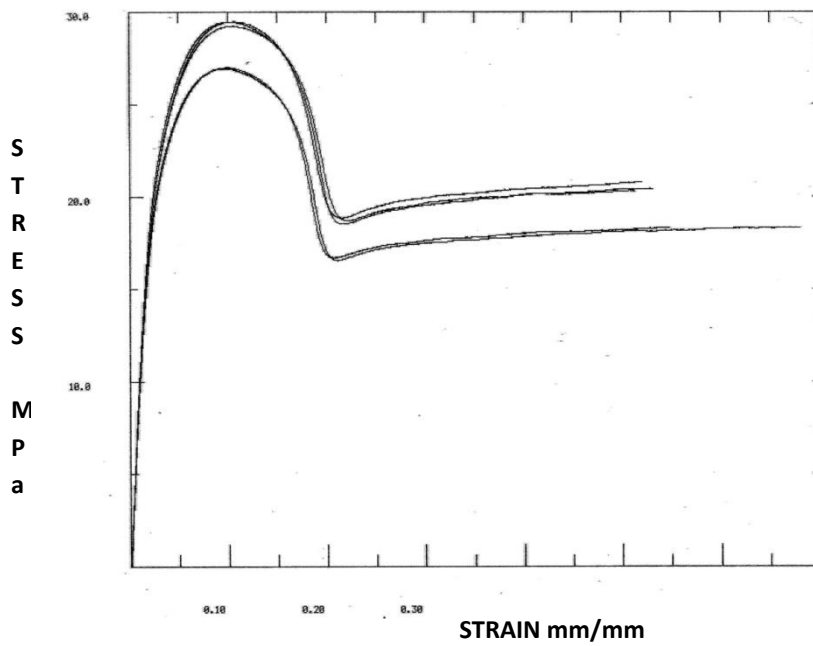
**Fig 4.3.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PEHD – 5% fibra



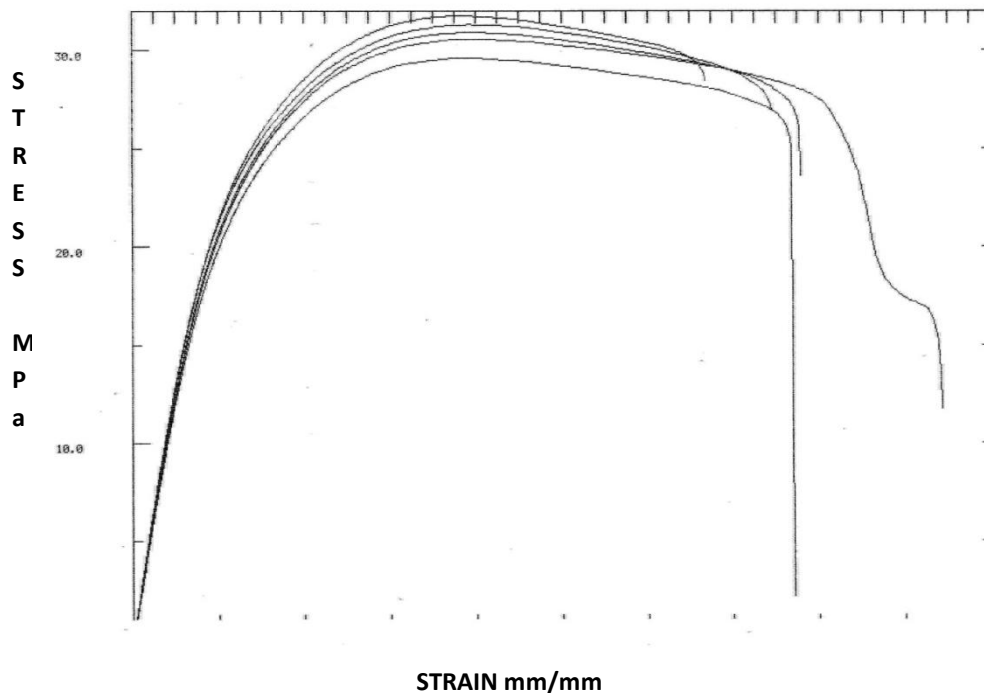
**Fig 4.4.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PEHD – 10% fibra



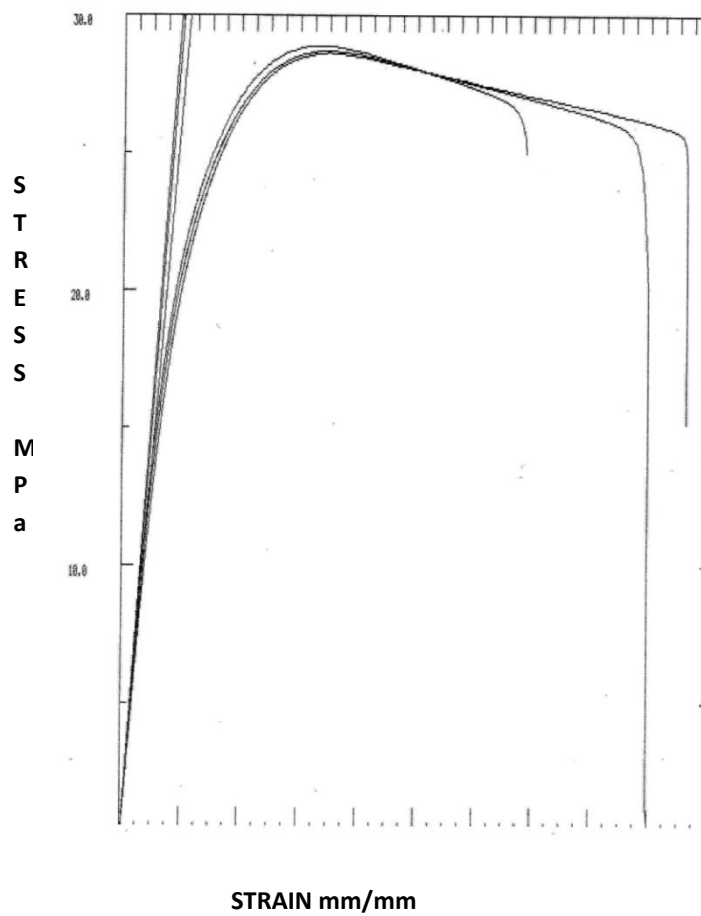
**Fig 4.5.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PEHD -15% fibra



**Fig 4.6.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PP - 0% fibra



**Fig 4.7.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PP – 5% fibra



**Fig 4.8.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PP – 10% fibra

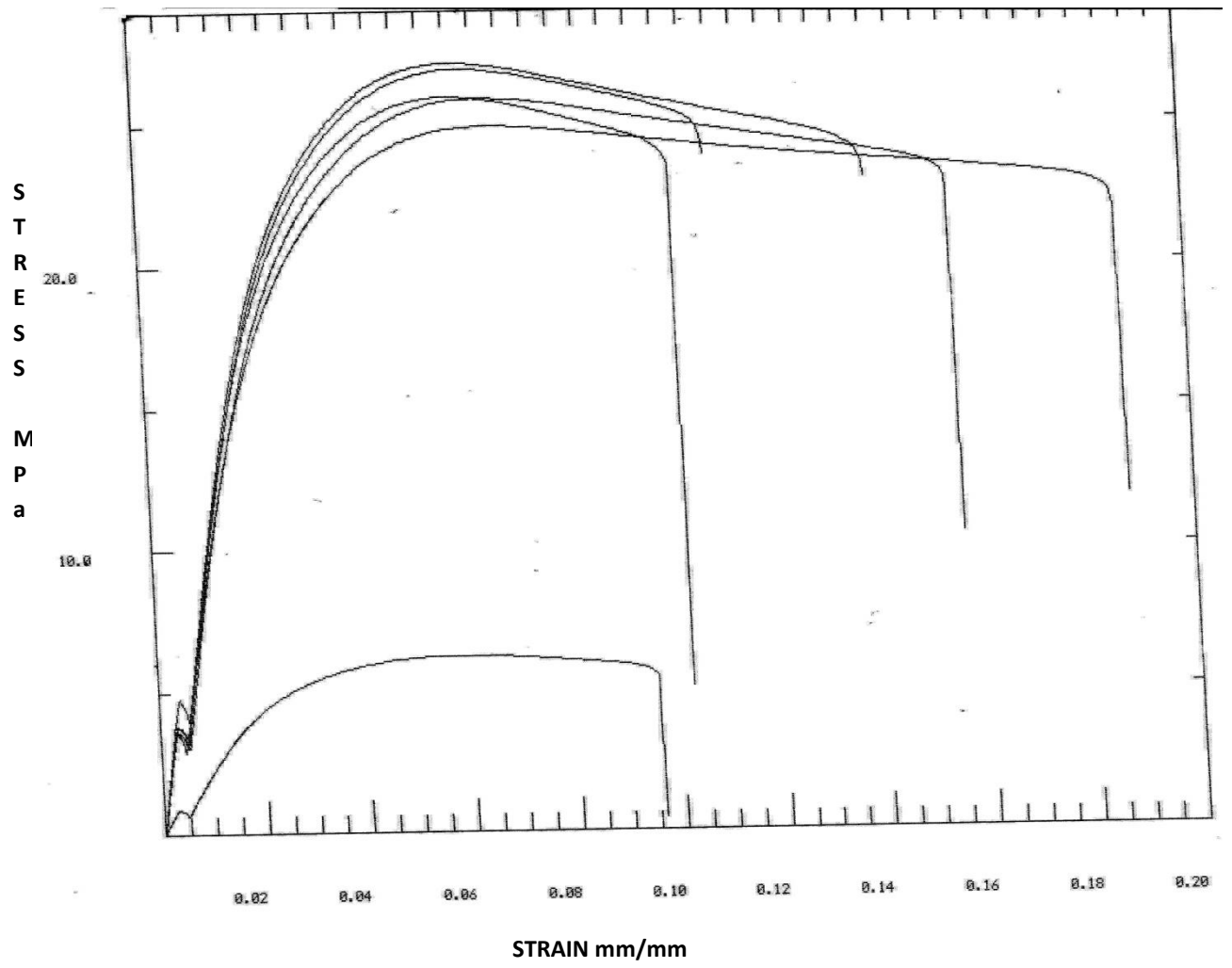
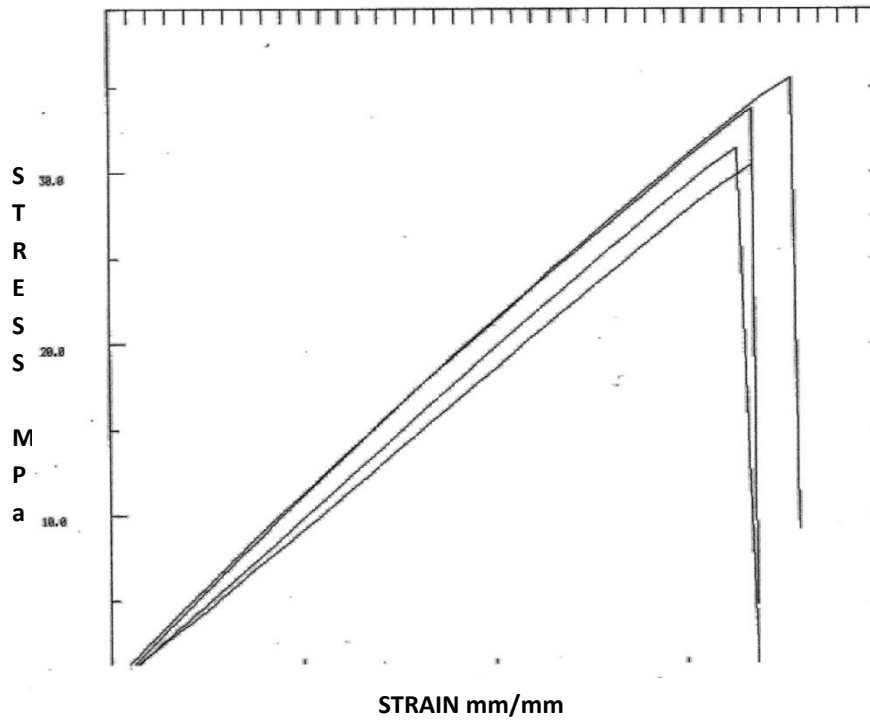
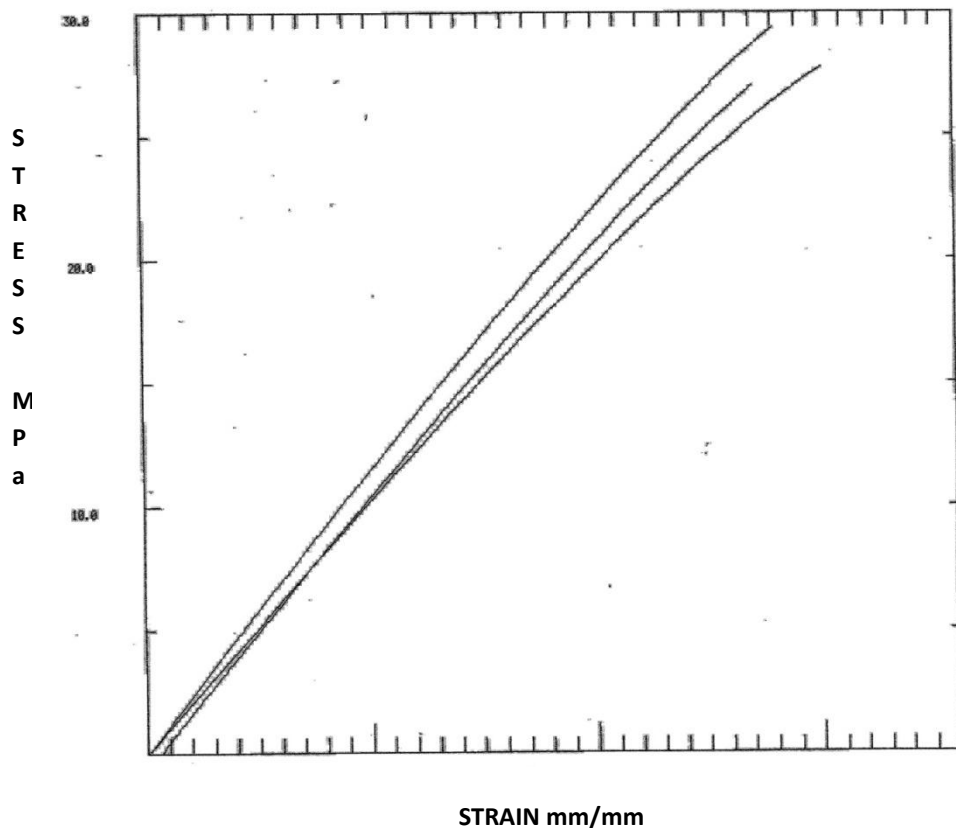


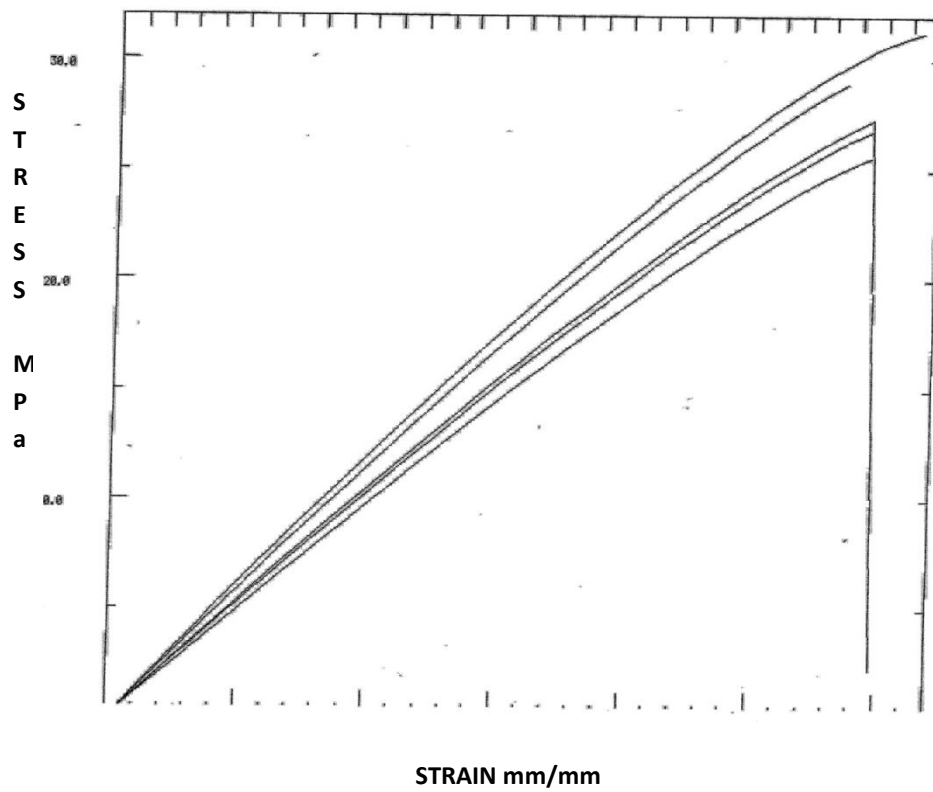
Fig 4.9. Análisis del ensayo de tracción del compuesto PP – 15% fibra



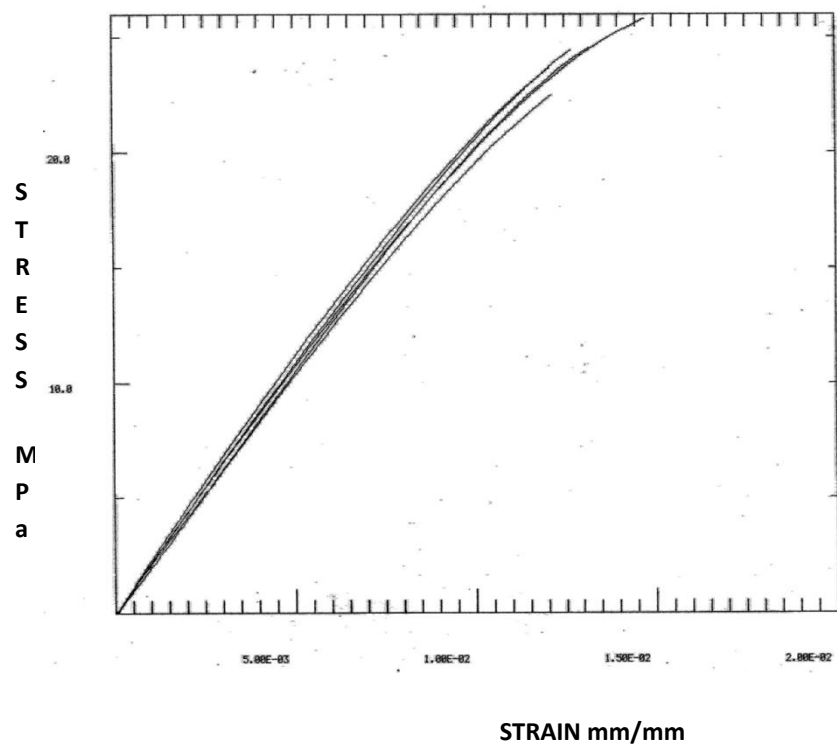
**Fig 4.10.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PGGS – 0% fibra



**Fig 4.11.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PGGS – 5% fibra

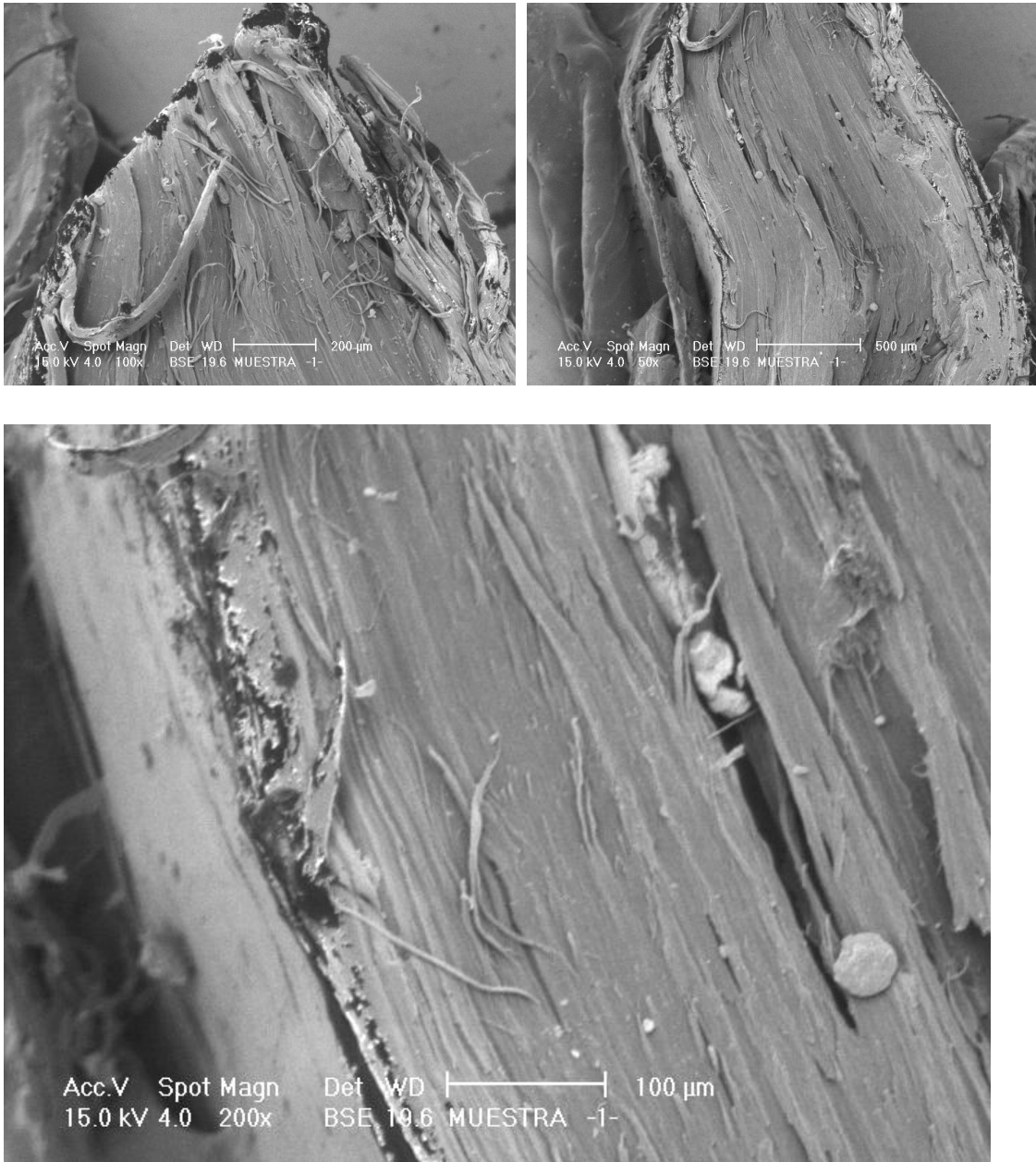


**Fig 4.12.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PGGS – 10% fibra



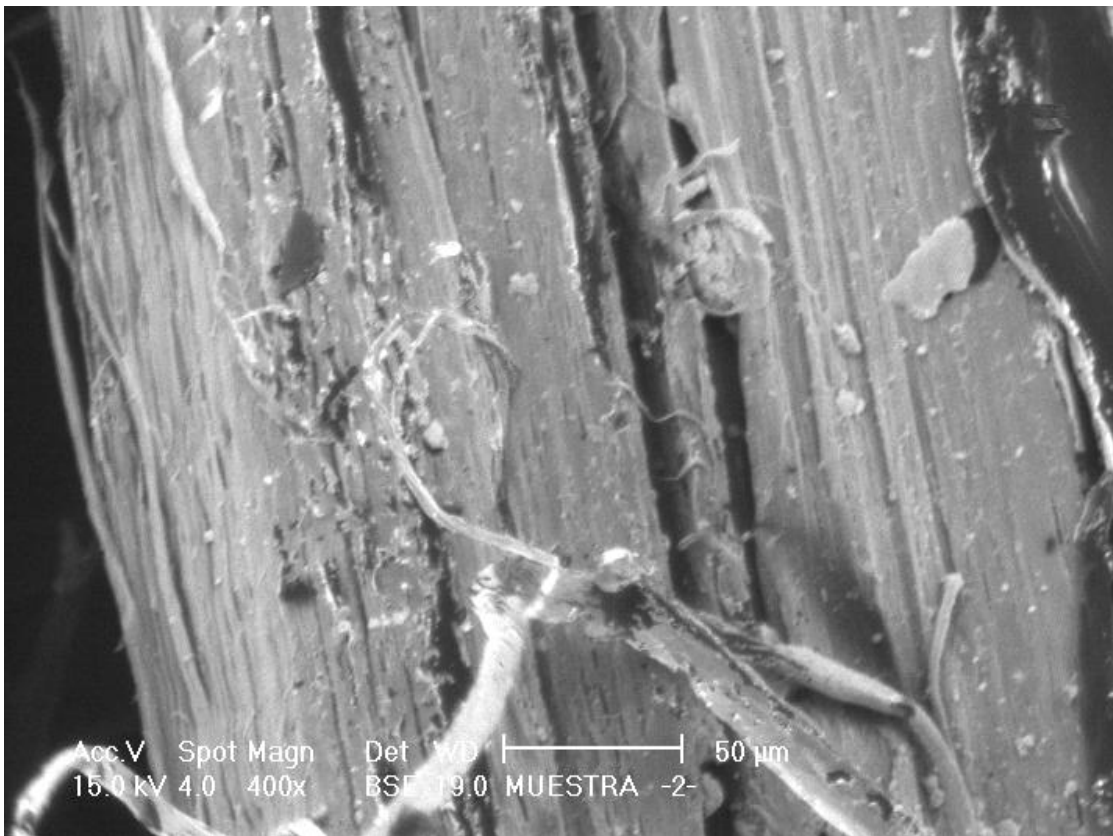
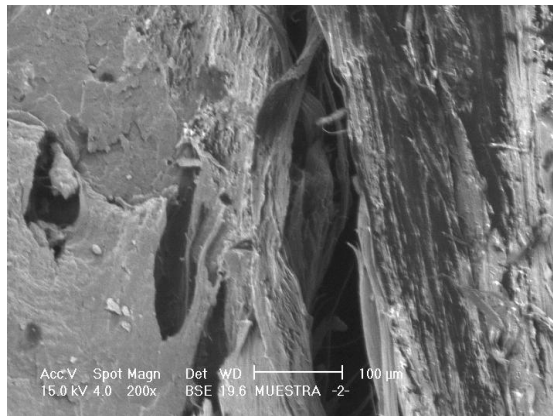
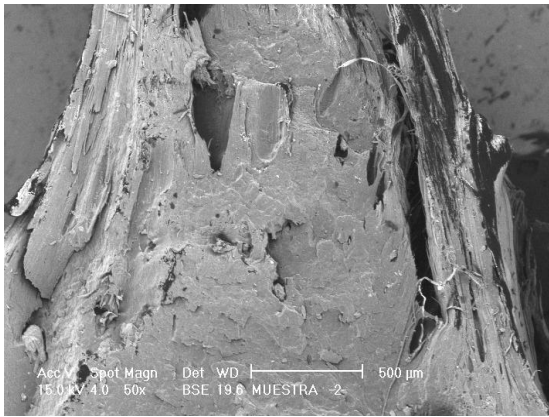
**Fig 4.13.** Análisis del ensayo de tracción del compuesto PGGS – 15% fibra

## APENDICE B

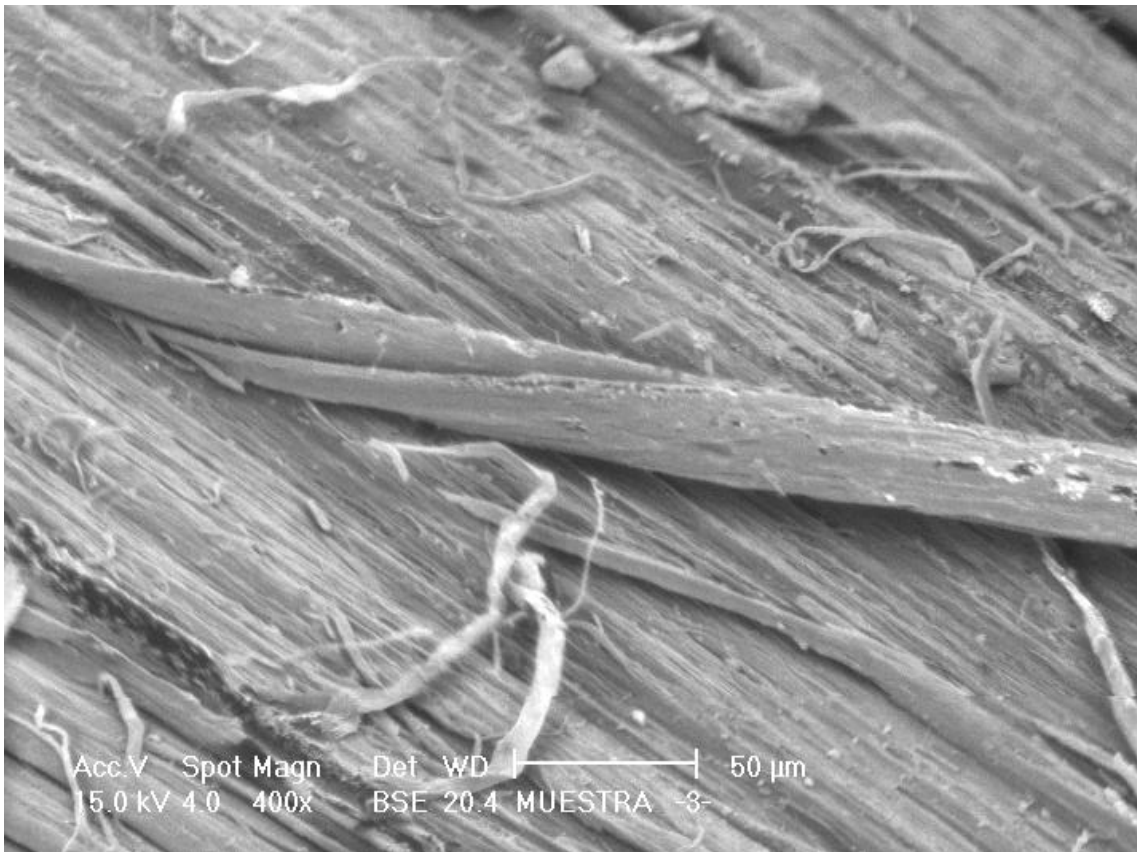
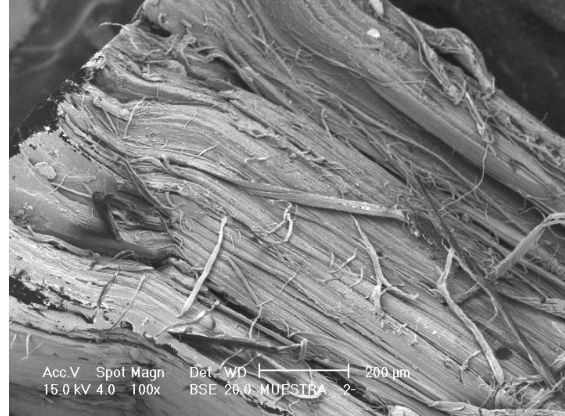
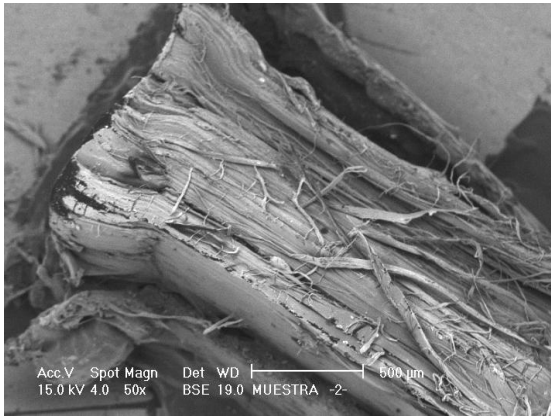


**Fig. 4.14.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 10% de FN con tratamientos en ácido maléico. Observación a 50X, 100X y 200X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

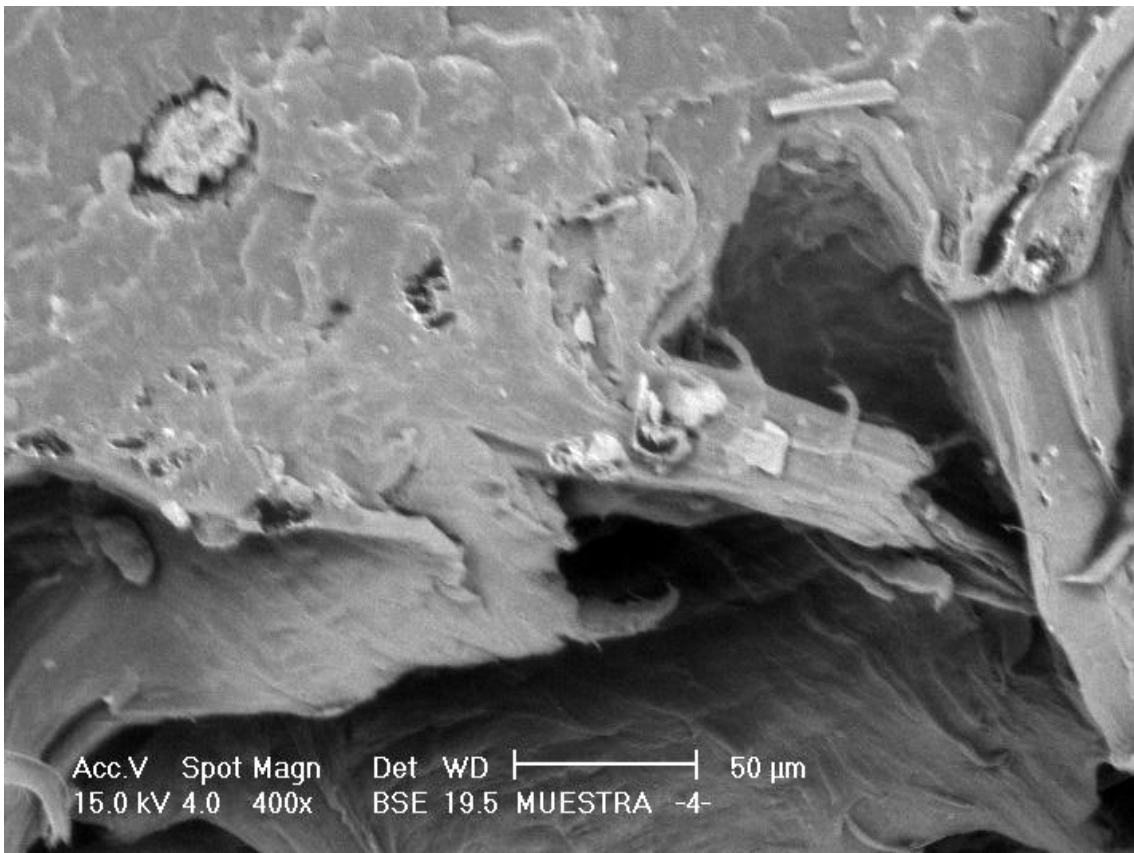




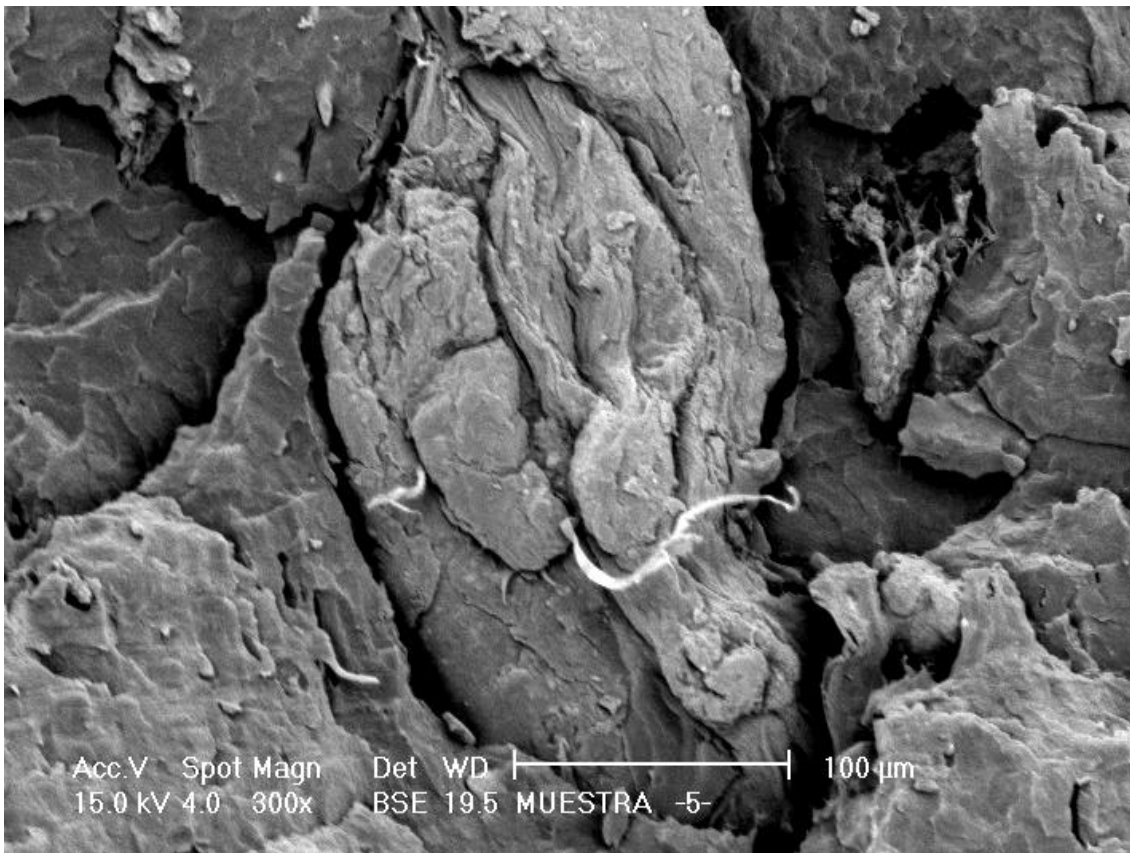
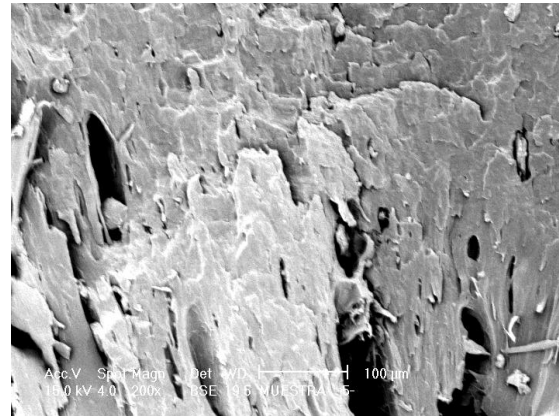
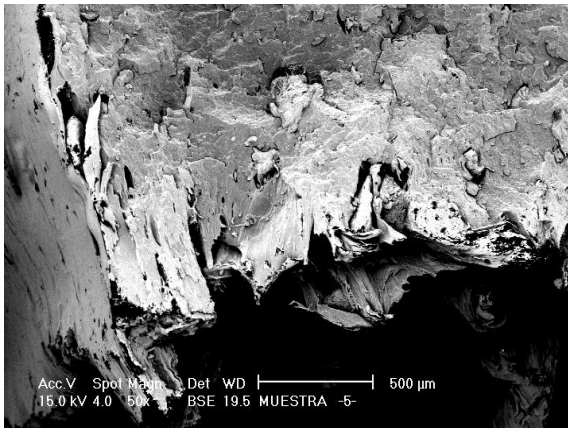
**4.15.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 15% de FN con tratamientos en ácido maléico. Observación a 50X, 200X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.



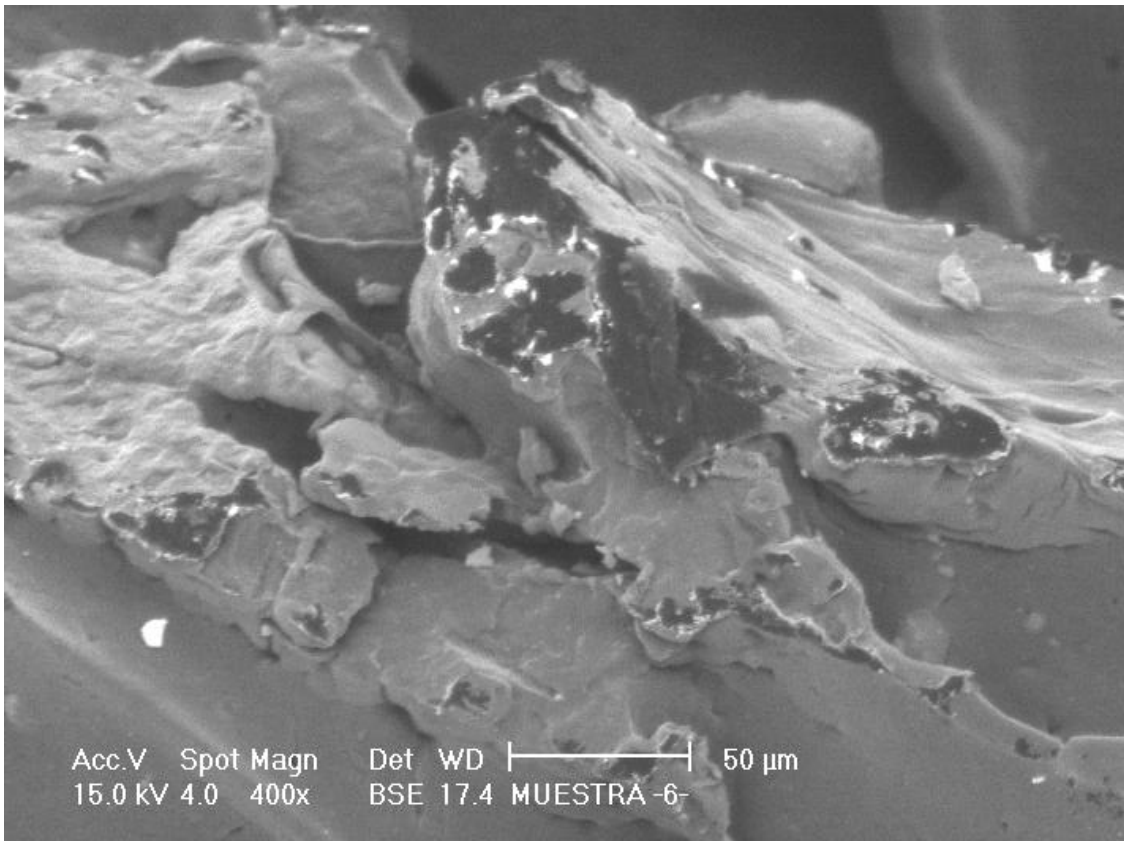
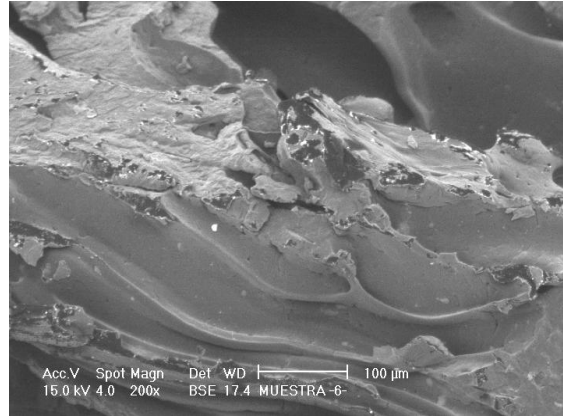
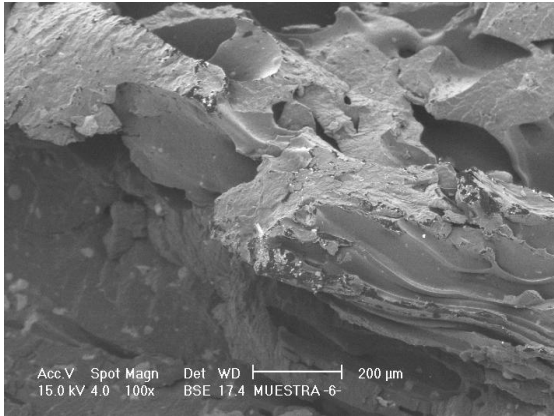
**4.16.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 5% de FN sin tratamiento. Observación a 50X, 100X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.



**4.17.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 5% de FN con tratamientos en ácido maléico. Observación a 100X, 200X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

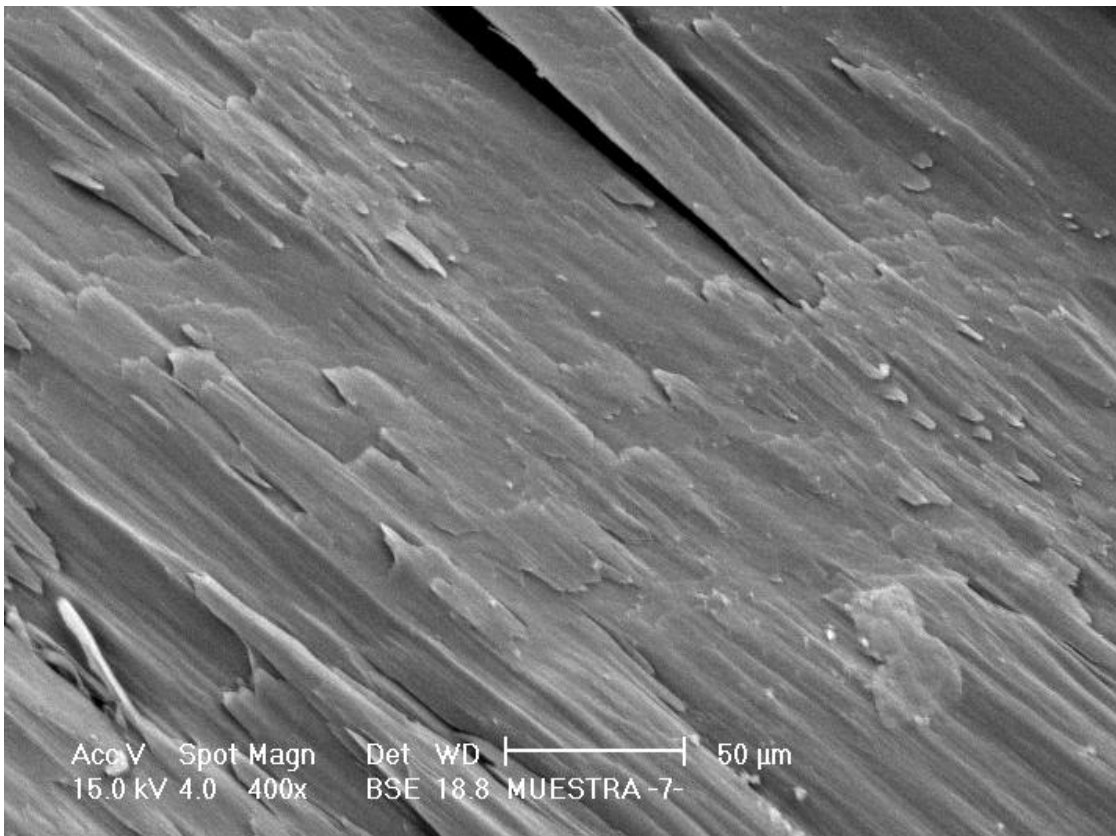
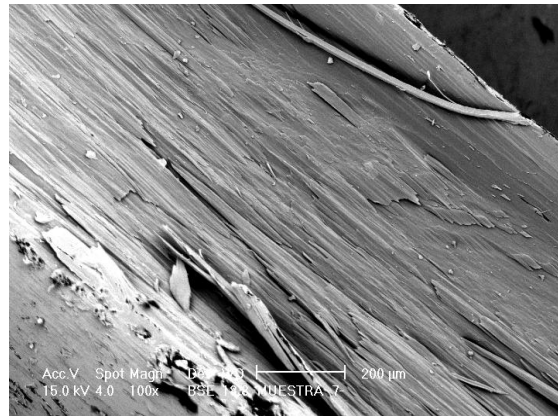
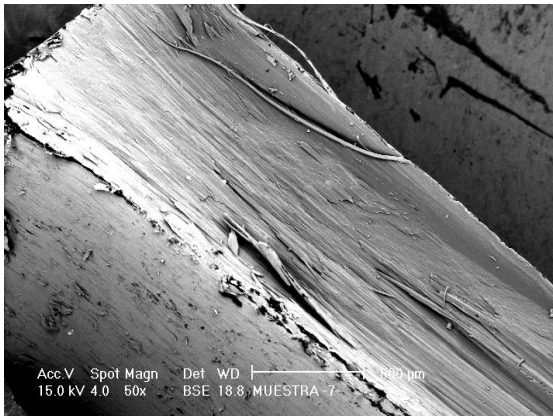


**4.18.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 10% de FN sin tratamiento. Observación a 50X, 100X y 300X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

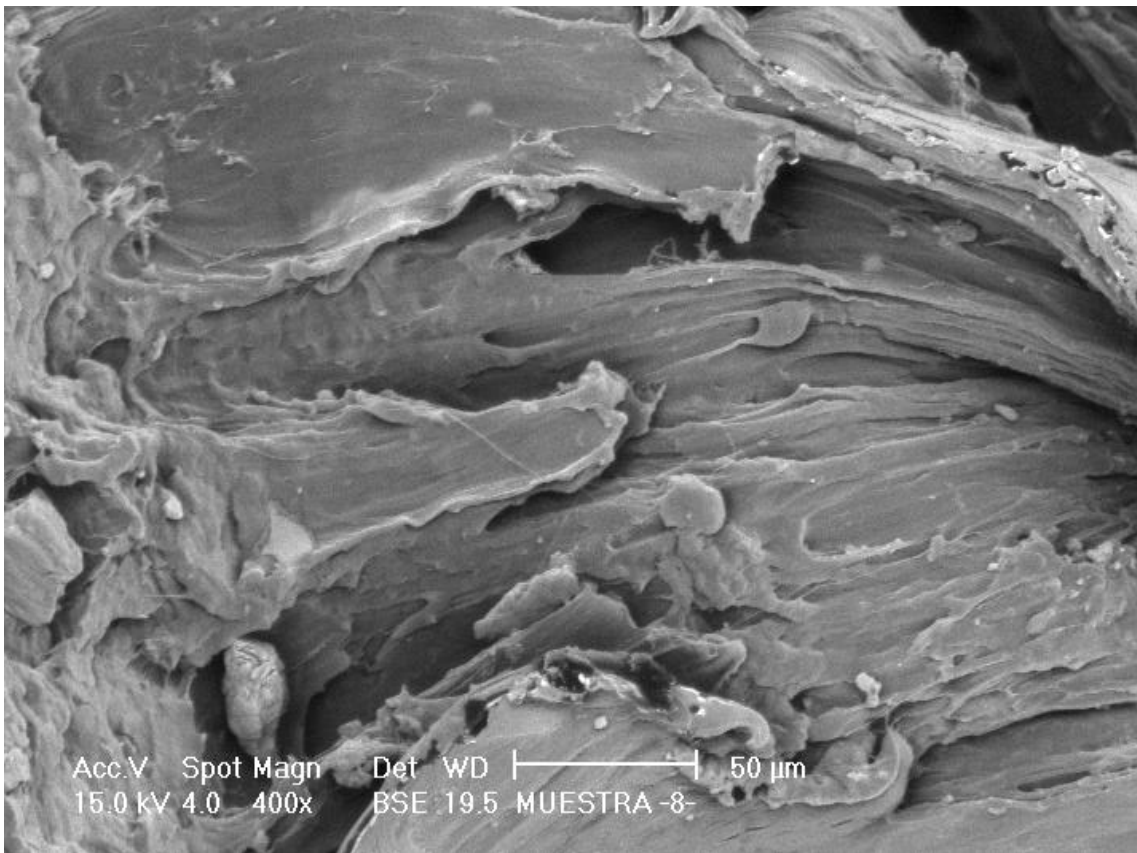
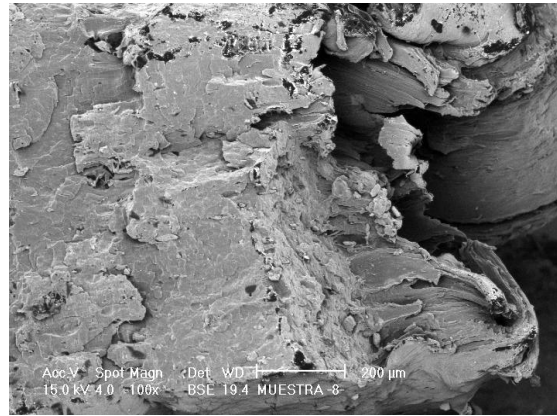
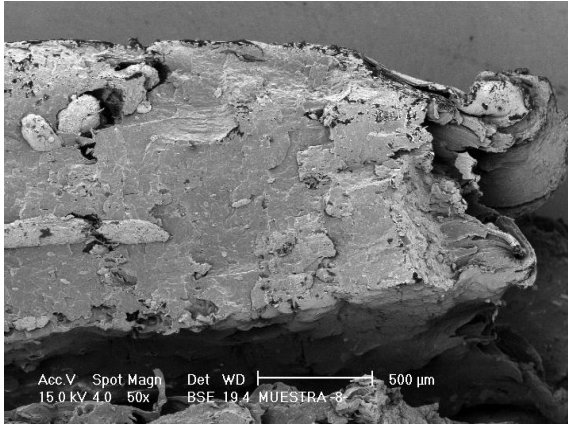


**4.19.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 15% de FN sin tratamiento. Observación a 100X, 200X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

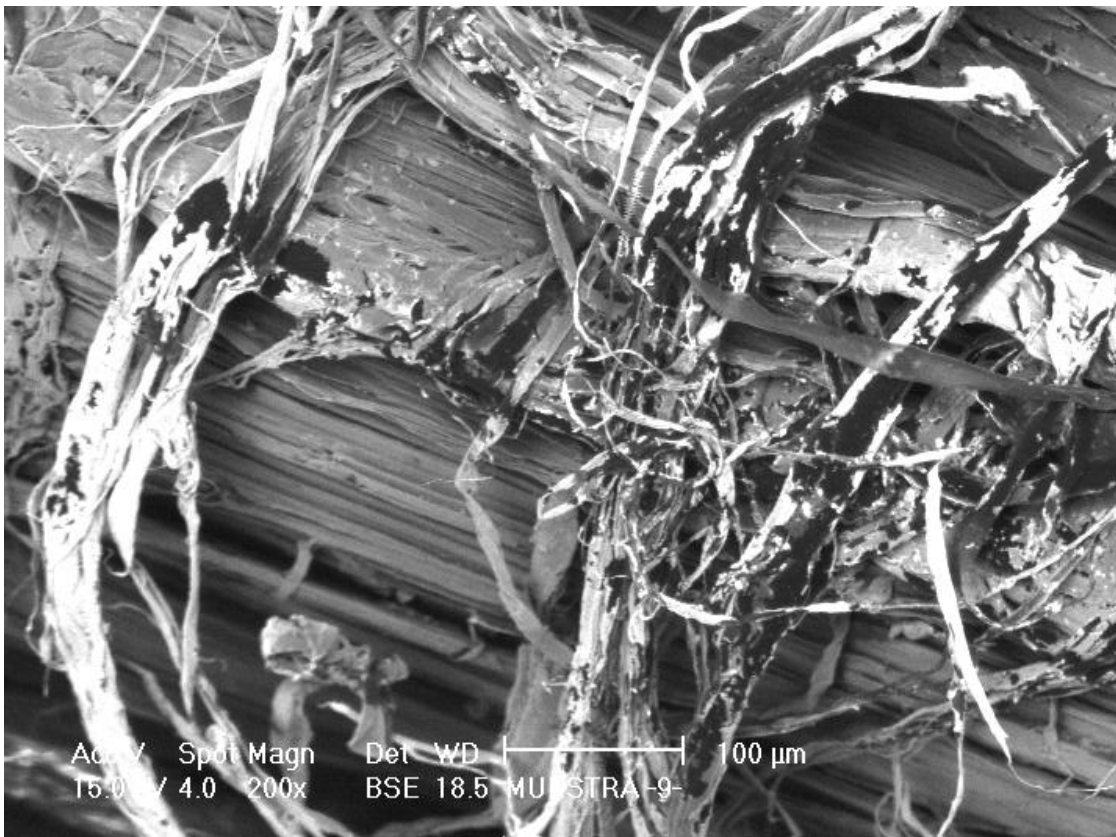
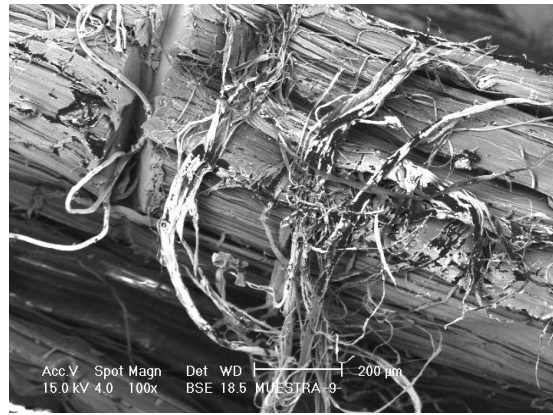
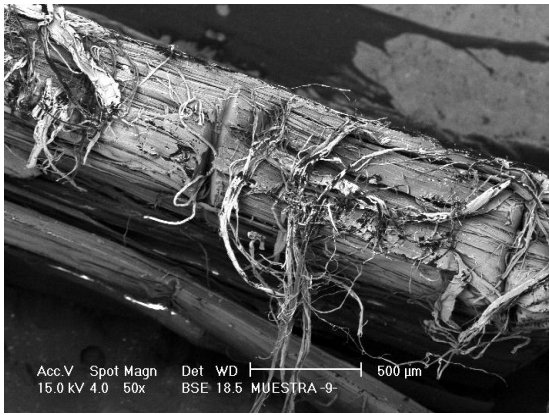




**4.20.** Polimero en la zona de fractura. La observación corresponde a polipropileno virgen. Observación a 50X, 100X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

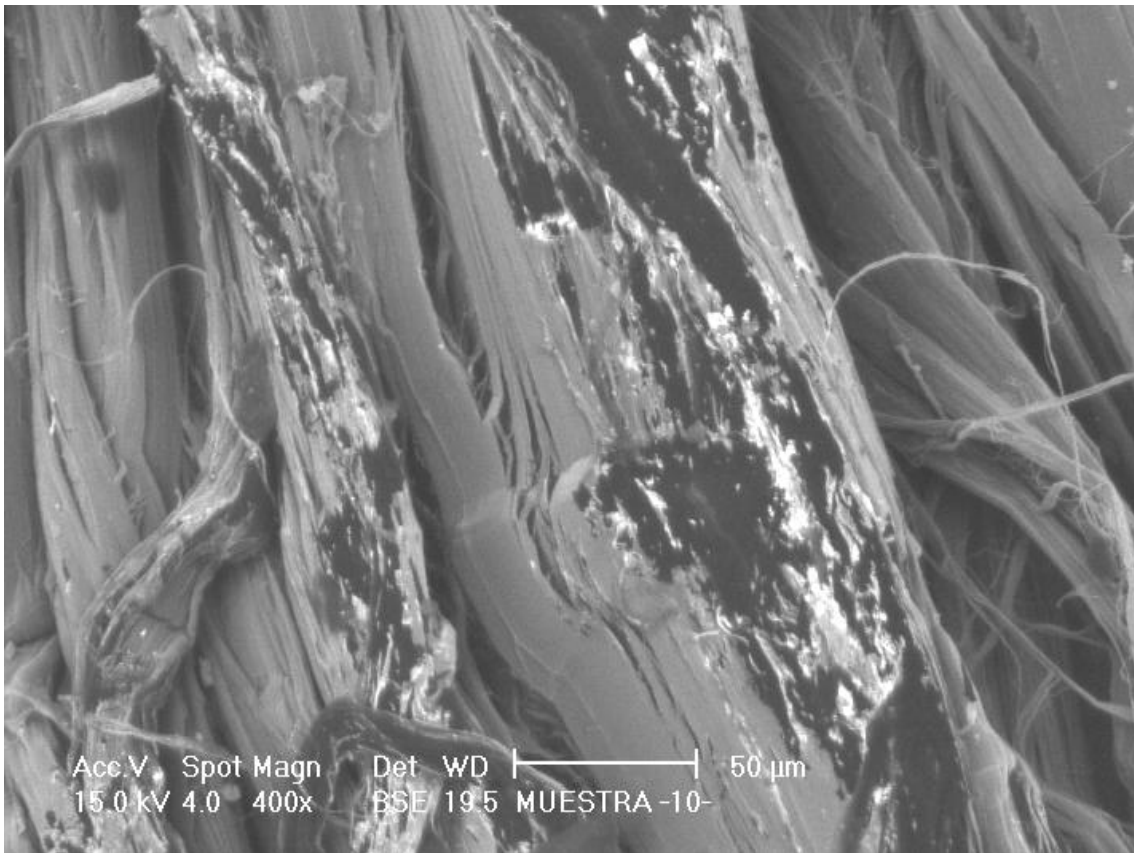
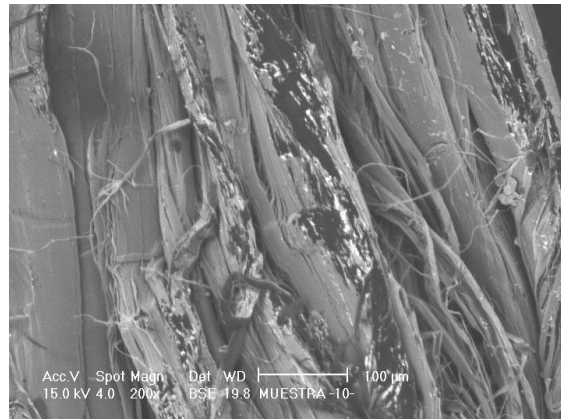
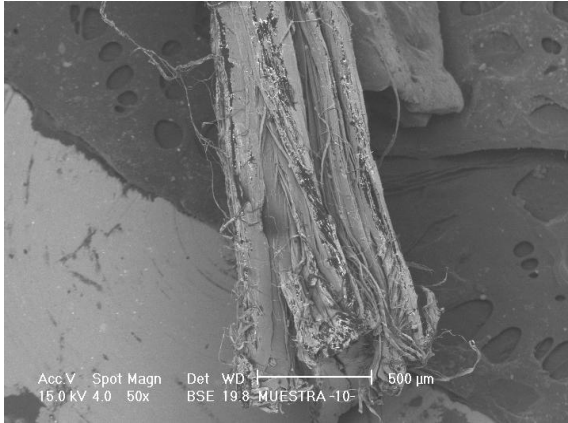


**4.21.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde a polipropileno al 15% de FN con tratamientos en cera polimérica. Observación a 50X, 100X y 200X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

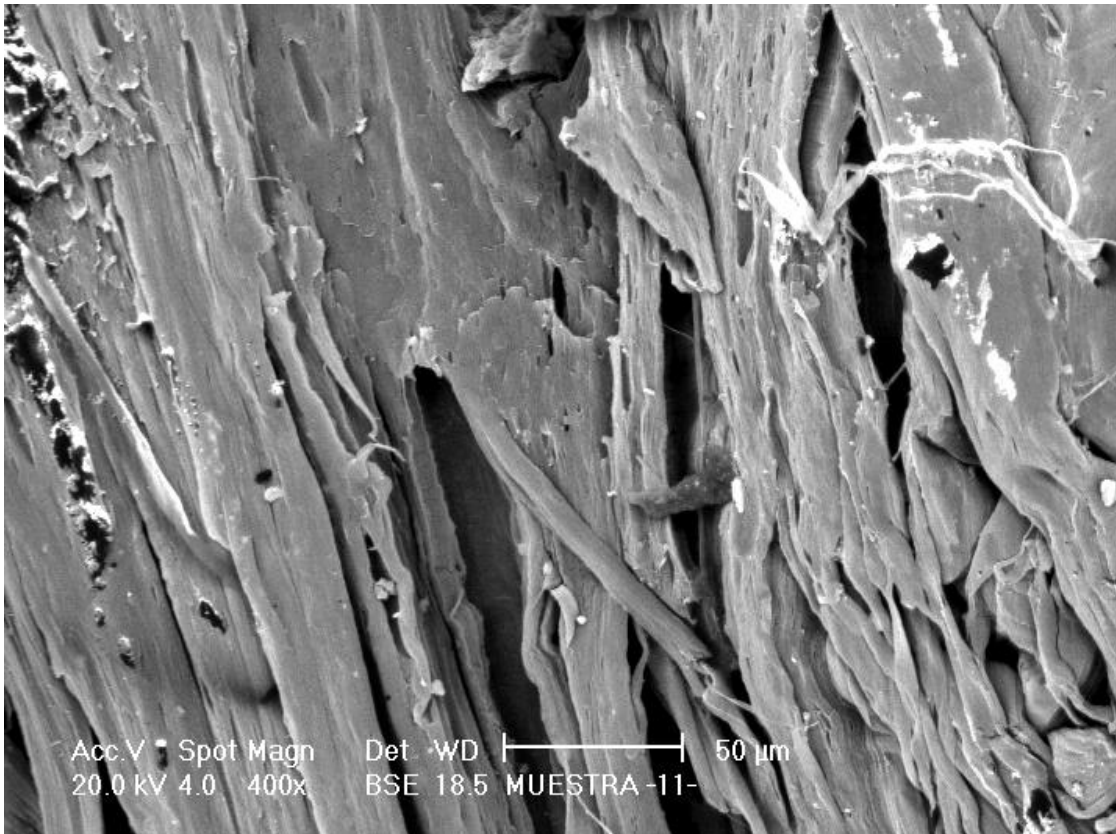
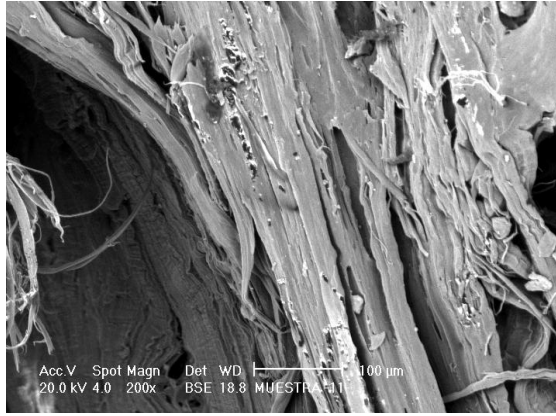
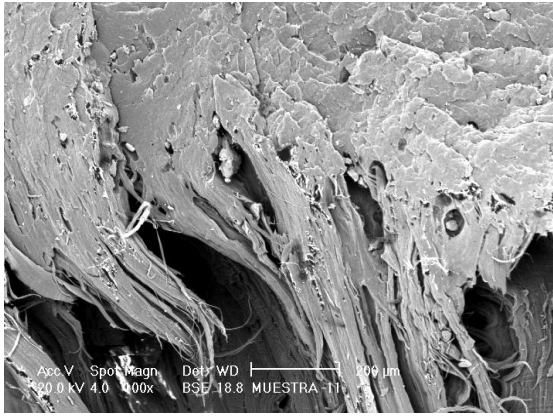


**4.22.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde al polietileno de alta densidad al 10% de FN con tratamientos en ácido maleico. Observación a 50X, 100X y 200X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

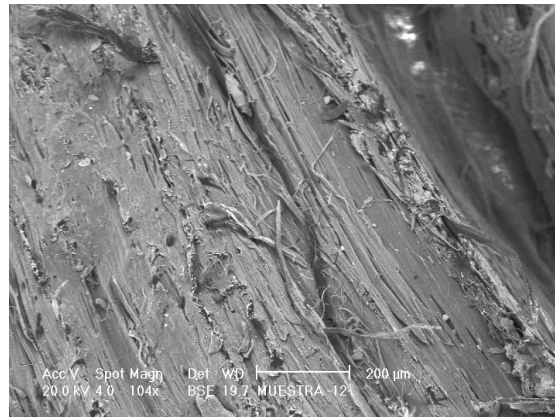




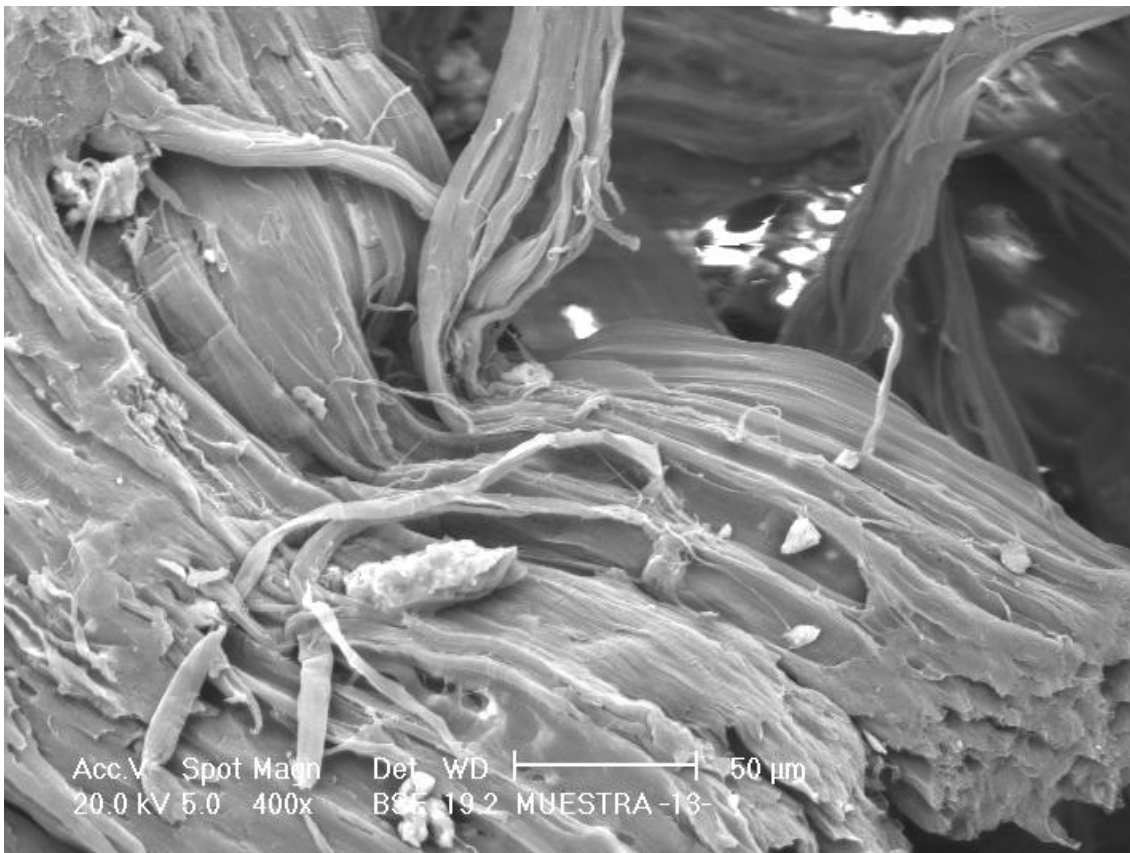
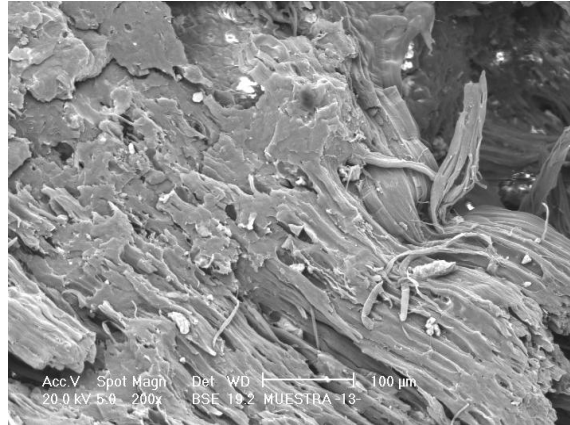
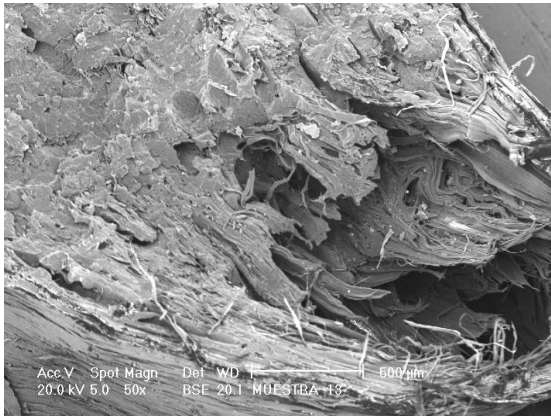
**4.23.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde al polietileno de alta densidad al 5% de FN con tratamientos en ácido maleico. Observación a 50X, 200X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.



**4.24.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde al polietileno de alta densidad al 15% de FN con tratamientos en cera polimérica. Observación a 100X, 200X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

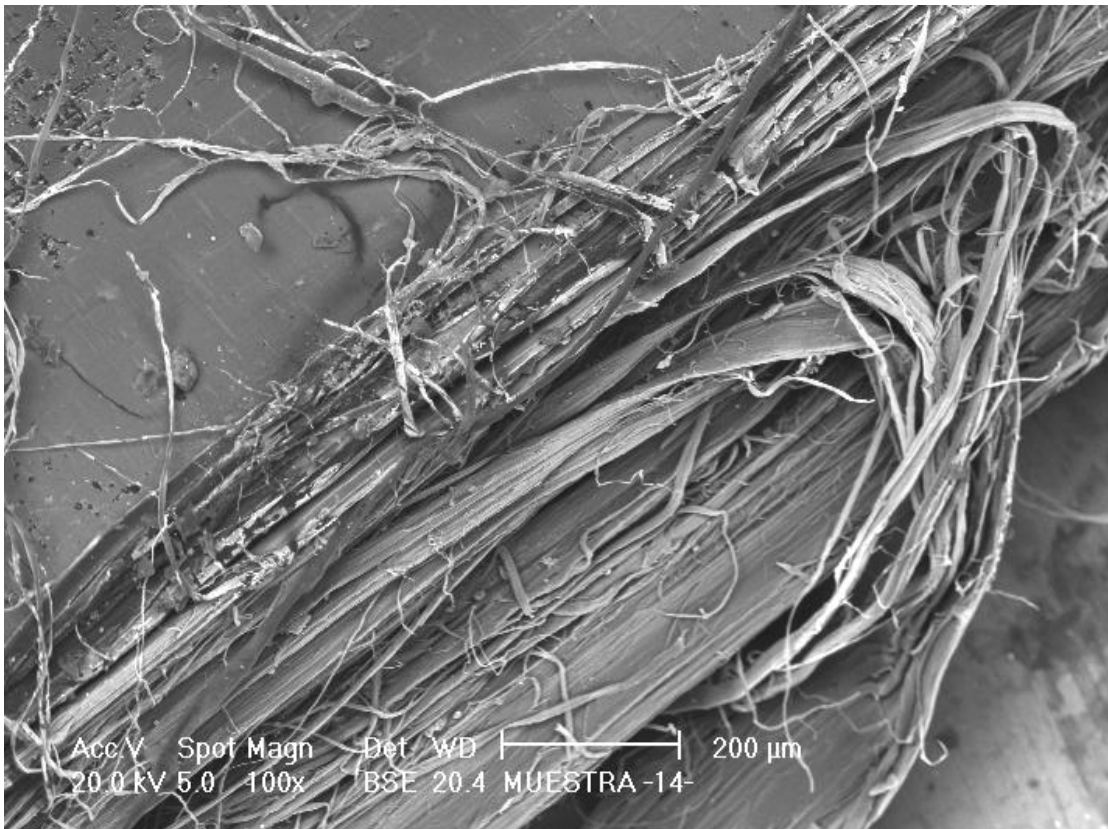


**4.25.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde al polietileno de alta densidad al 15% de FN sin tratamiento. Observación a 50X, 100X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

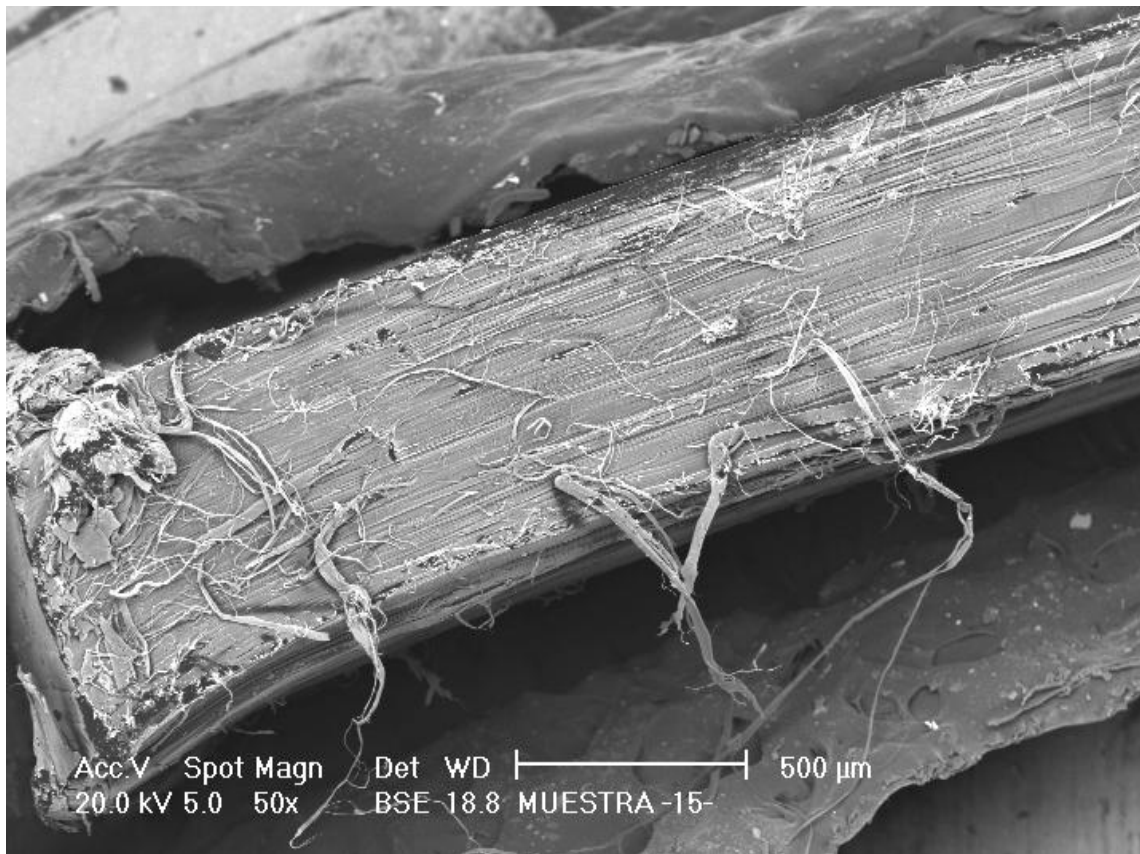


**4.26.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde al polietileno de alta densidad al 15% de FN sin tratamiento. Observación a 50X, 100X y 400X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

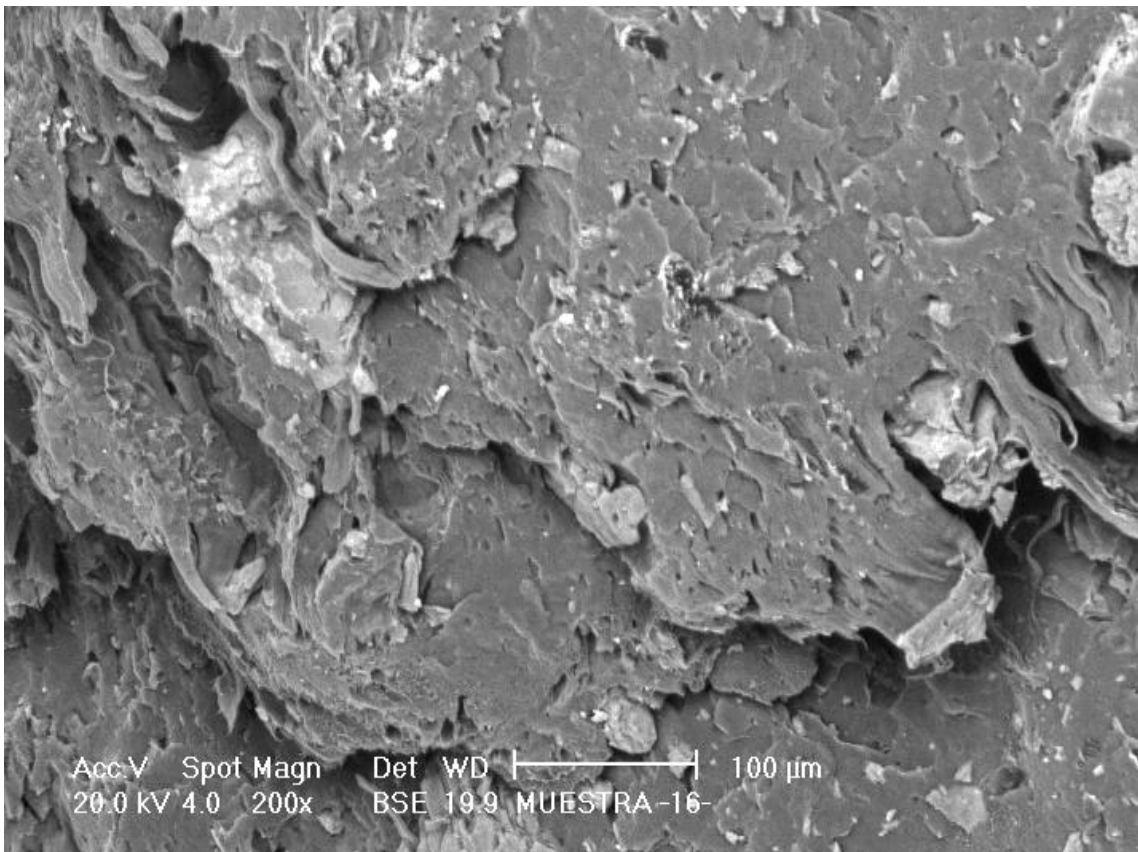
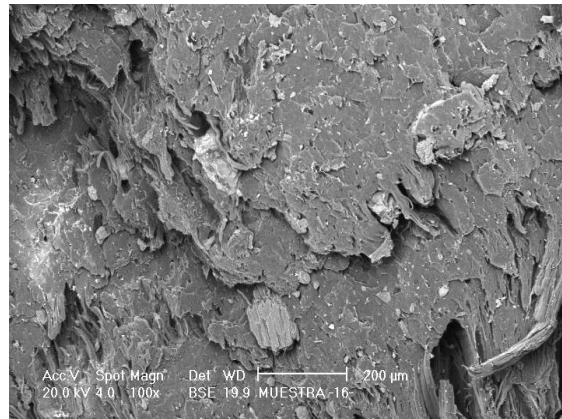




**4.27.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde al polietileno de alta densidad al 10% de FN sin tratamiento. Observación a 50X, 100X y 200X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.



**4.28.** Fibra en la zona de fractura. Se aprecia claramente que se trata de un paquete de fibras de menor tamaño, éstas no se encuentran embebidas en el polímero. La observación corresponde al polietileno de alta densidad al 5% de FN sin tratamiento. Observación a 50X, 100X y 200X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.



**4.29.** Polímero en la zona de fractura. La observación corresponde a polietileno de alta densidad virgen. Observación a 50X, 100X y 200X con BSE (Backscattering electron) Electrones retrodispersados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Muños-Hernandez, G. "Mechanical Modeling of Agricultural Fibrous Materials whit Applications to the densification Process" Paper 006095, ASAE Annual Meeting, Milwaukee, WI, USA, 2001.
2. Derek Hull. "An Introduction to composite materials", Cambridge Solid State Science Series. Cambridge University Press: pp 9-80.
3. Jiménez, O. "Problemática para la obtención de plásticos reforzados con fibras naturales", X Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Querétaro, pp, 2004.
4. Rowell, R. M. Utilization of recycled agriculture-based fiber for composites. Plastic, rubber and paper recycling, American chemical society: pp 357-366. 1995.
5. Arroyo M. & Ibarra L. "Fibras orgánicas cortas como refuerzo de matrices poliméricas", Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros, CSIC. 1994.
6. "Enciclopedia del Plástico". Instituto Mexicano del Plástico Industrial IMPI. Inyección de Plásticos, Curso Teórico Practico. Edit. Centro Empresarial del Plástico 2da. Ed., Volumen 3, México 2000.
7. M. Adela de la Cruz M. "Desarrollo De Compuestos De Fibras De Nopal Y Polímero Termoplástico". Instituto Tecnológico de Zacatecas. Zacatecas, pp, 2009.
8. Adolfo Altamirano M. Estudio comparativo de pruebas de tracción de materiales compuesto de bagazo de caña y bagazo de agave, Tesis 2008. pp.33
9. Quesada-Solís K., Alvarado-Aguilar P., "Utilización de fibras de rastrojo de piña como material en resinas Poliéster". Laboratorio de polímeros POLIUNA, Universidad Nacional. Costa Rica: Laboratorio de Adhesión y Adhesivos, Universidad de Alicante, Revista Iberoamericana de Polímeros, Volumen 6(2), España, 2005
10. J.M. Arribas, F.J. Gómez et al. Compuesto de polipropileno con fibras naturales, Dirección de tecnología del centro tecnológico Repsol y el Departamento de Física y Polímeros del instituto de Ciencia y Tecnología en polímeros de Madrid, Revista de plástico Modernos, Vol.88, no.582. España 2004.
11. <http://www.polymat.com.mx/polymat/images/stories/Fichas%20Tecnicas>
12. [http://www.quiminet.com/art/ar\\_b%2580Z%257F%252BhJ%257B.php](http://www.quiminet.com/art/ar_b%2580Z%257F%252BhJ%257B.php)
13. <http://www.mundomaterial.eu/2009/02/26/plasticos-fibras-naturales-y/>



13.[http://www.plastico.com/pragma/documenta/plastico/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARTICULOS/REPORTAJESHOME/doc\\_41542\\_HTML.html?idDocumneto=41542](http://www.plastico.com/pragma/documenta/plastico/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARTICULOS/REPORTAJESHOME/doc_41542_HTML.html?idDocumneto=41542)  
(Julio 2005)