



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

“ EFECTO DE PARTICULAS DE ARCILLA-LISINA, GRAFITO,  
NANOTUBOS DE CARBONO Y ADITIVOS ESPUMANTES  
SOBRE PROPIEDADES FISICOMECÁNICAS DE  
POLIPROPILENO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

DIANA STEPHANI DURÁN CONTRERAS



CIUDAD DE MÉXICO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ANTONIO SÁNCHEZ SOLÍS

2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN  
ESCOLAR  
PRESENTE.

Comunico a usted que al alumno(a) Durán Contreras Diana Stephani con número de cuenta 30825505-2 de la carrera Ingeniería Química, se le ha fijado el día 09 del mes de Septiembre de 2016 a las 17:00 horas para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

|            |   |
|------------|---|
| PRESIDENTE | Q.F.I. MARÍA DEL CARMEN NIÑO DE RIVERA<br>OYARZABAL |
| VOCAL      | DR. ANTONIO SÁNCHEZ SOLÍS                           |
| SECRETARIO | M. EN C. ANA LILIA MALDONADO ARELLANO               |
| SUPLENTE   | I.Q. JUDITH VENTURA CRUZ                            |
| SUPLENTE   | I.Q. BLAS MALDONADO SÁNCHEZ                         |

El título de la tesis que se presenta es: "Efecto de Partículas de Arcilla-Lisina, Grafito, Nanotubos de Carbono y Aditivos Espumantes sobre Propiedades Fisicomecánicas de Polipropileno".

Opción de Titulación: Convencional

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
México, D. F. a 08 de Agosto de 2016.

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NUÑEZ  
DIRECTOR

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
ZARAGOZA



DIRECCIÓN

I.Q. DOMINGA ORTIZ BALBUENA  
JEFA DE LA CARRERA DE I.Q.

RECIBI:  
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES  
Y DE GRADO

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de pertenecer a esta máxima casa de estudios y adquirir mi formación académica.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza y a sus profesores por los conocimientos adquiridos.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo dentro de sus instalaciones.

Al Dr. Antonio Sánchez Solís por la orientación que me brindo, el apoyo, la confianza que deposito en mi y los conocimientos que me transmitió, pero sobre todo por la paciencia que tuvo durante las horas de trabajo.

Al M. en C. Eliezer Hernández por su apoyo y disposición en la realización de pruebas mecánicas.

A la M. en C. Damaris Cabrero Palomino y su alumna Karla Eriseth Reyes Morales por la determinación de propiedades térmicas.

Al Dr. Omar Novelo Peralta y Fis. Josué Romero por su apoyo en la determinación morfológica a través de microscopia electrónica de barrido.

Al Ingeniero Caín González por el apoyo técnico computacional.

Al Ingeniero Fernando Silvar Gómez por el servicio de nitrógeno líquido.

A mis compañeros de laboratorio Vianney, Jazmín, Ricardo, Lizbeth e Isis por brindarme su apoyo y ayudarme siempre que lo necesite.

A todas las personas que directa o indirectamente colaboraron en el desarrollo y culminación de este trabajo.

A mis sinodales Q.F.I. María del Carmen Niño de Rivera, a la M. en C. Ana Lilia Maldonado, a la I.Q. Judith Ventura y al I.Q. Blas Maldonado, gracias por su tiempo, consejos y comentarios para la mejora y enriquecimiento de ésta tesis.

## DEDICATORIAS

*A mis padres Julio Durán y Alma Contreras por apoyarme siempre para poder cumplir todas y cada una de mis metas y sueños, por su confianza y por todos sus consejos que depositaron en mí, por apoyarme siempre que lo necesite, pero sobre todo por el gran amor que siempre me han brindado y demostrado, gracias por estar siempre a mi lado. Mi triunfo es el de ustedes.*

*A ti papá por enseñarme que siempre puedo lograr lo que me proponga por muy difícil que parezca ser, por creer en mí siempre, por enseñarme a tener confianza en mí y enseñarme a nunca perder la fe. Por cuidar de mí en todo momento, ser mi guía y ser mi ejemplo a seguir pero sobre todo muchas gracias por ser mi amigo, estar conmigo siempre que te necesite y demostrarme que nunca voy a estar sola. Gracias por tu motivación constante para ser de mí una persona de bien. Te quiero mucho papá.*

*A ti mamá gracias por todo tu apoyo y paciencia que me tuviste, por ayudarme a salir adelante en los momentos más difíciles, por demostrarme tu comprensión en todo momento, celebrando mis triunfos pero sobre todo corrigiendo mis faltas y enseñarme a aprender de mis errores. Gracias por enseñarme a salir adelante en los momentos más difíciles, por escucharme y ser mi gran consejera en todo momento y demostrarme que la vida también necesita un poco de diversión. Gracias por demostrarme que puedo salir adelante yo sola. Te quiero mucho mamá.*

*A ti Paola por ser mi hermana y sobre todo mi amiga. Por apoyarme en todo momento y aunque la mayoría de veces parece que estuviéramos en una batalla hay momentos en los que la guerra cesa y nos unimos para lograr nuestros objetivos, gracias no solo por ayudarme en gran manera a concluir el desarrollo de esta tesis, sino por todos los bonitos momentos que pasamos en el proceso. Por comprenderme en los momentos más difíciles y por enseñarme a sonreír hasta en los momentos más difíciles.*

*A mis amigos Carolina Hernández, Diana Núñez y Eduardo Zamora, gracias por su grandiosa amistad durante tantos años, por todo el apoyo que me han brindado y por seguir compartiendo maravillosos momentos, por estar siempre conmigo a pesar de las distancias. Gracias a mis amigos Gizeh Rayón, Jasmín González, Rafael Contreras, Eduardo Hernández, Rubén Hilarión, Diana Jiménez, Rosaura Picazo, Blanca Sotelo y Andrés De Jesús, gracias a todos y cada uno de ustedes por ayudarme a superar mis miedos, nervios y*

*sobre todo mis inseguridades, durante todo este tiempo he aprendido muchas cosas valiosas de ustedes. Muchas gracias por apoyarme, aconsejarme y escucharme en todo momento, por la gran amistad que me han brindado durante estos años y que hicieron que la estancia en la universidad fuera alegre, divertida, pero sobre todo inolvidable.*

*Finalmente a todas y cada una de las personas que han sido parte fundamental de mi formación académica, **MUCHAS GRACIAS.***

# Contenido

|  |    |
|--|----|
| <b>Abreviaturas</b> .....                            | 1  |
| <b>Lista de Figuras</b> .....                        | 2  |
| <b>Lista de Tablas</b> .....                         | 5  |
| <b>Resumen</b> .....                                 | 6  |
| <b>Objetivos</b> .....                               | 7  |
| <b>Hipótesis</b> .....                               | 7  |
| <b>Introducción</b> .....                            | 8  |
| <b>Capítulo I</b> .....                              | 10 |
| <b>Antecedentes</b> .....                            | 10 |
| 1.1 Polímeros .....                                  | 10 |
| 1.2 Clasificación de polímeros .....                 | 11 |
| 1.3 Polímeros Cristalinos y Amorfos .....            | 15 |
| 1.4 Nanocompuestos .....                             | 16 |
| 1.5 Espumantes .....                                 | 18 |
| 1.5.1 Clasificación de Agentes Espumantes .....      | 19 |
| 1.5.2 Estructura Celular de las Espumas .....        | 21 |
| <b>Capítulo II</b> .....                             | 24 |
| <b>Generalidades</b> .....                           | 24 |
| 2.1 Polipropileno (PP) .....                         | 24 |
| 2.1.1 Características .....                          | 26 |
| 2.1.2 Propiedades del Polipropileno Isotáctico ..... | 28 |
| 2.1.3 Procesos de Producción .....                   | 32 |
| 2.2 Polipropileno Espumado (EPP) .....               | 36 |
| 2.2.1 Procesamiento .....                            | 37 |
| 2.3 Arcillas .....                                   | 38 |
| 2.3.1 Estructura .....                               | 38 |
| 2.3.2 Clasificación .....                            | 39 |
| 2.3.3 Bentonitas .....                               | 40 |
| 2.4 Grafito .....                                    | 44 |
| 2.4.1 Estructura .....                               | 44 |
| 2.5 Nanotubos de Carbono .....                       | 45 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.5.1 Estructura.....   | 46        |
| 2.5.2 Propiedades .....                                       | 47        |
| 2.6 Anhídrido Maléico (MAH).....                              | 47        |
| 2.6.1 Propiedades .....                                       | 47        |
| 2.6.2 Injerto de Anhídrido Maleico en Polipropileno .....     | 48        |
| 2.7 Procesamiento de Polímeros.....                           | 50        |
| 2.7.1 Extrusión .....   | 50        |
| 2.8 Caracterización de Polímeros.....                         | 52        |
| 2.8.1 Pruebas Mecánicas.....                                  | 52        |
| 2.8.2 Análisis Térmicos.....                                  | 56        |
| <b>Capítulo III</b> .....                                     | <b>59</b> |
| <b>Desarrollo Experimental</b> .....                          | <b>59</b> |
| 3.1 Metodología .....   | 59        |
| 3.2 Equipo.....   | 60        |
| 3.2 Materias Primas .....                                     | 61        |
| 3.4 Condiciones de Procesamiento.....                         | 64        |
| 3.5 Procedimiento para la Formulación de Nanocompuestos ..... | 65        |
| <b>Capítulo IV</b> .....                                      | <b>68</b> |
| <b>Resultados y Discusión</b> .....                           | <b>68</b> |
| 4.1 Propiedades Mecánicas .....                               | 68        |
| 4.2 Propiedades Térmicas .....                                | 76        |
| 4.3 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) .....            | 77        |
| <b>Capítulo V</b> .....                                       | <b>86</b> |
| <b>Conclusiones</b> .....                                     | <b>86</b> |
| <b>Trabajo Futuro</b> .....                                   | <b>88</b> |
| <b>Anexo</b> .....  | <b>89</b> |
| <b>Bibliografía</b> .....                                     | <b>94</b> |

## Abreviaturas

|            |   |
|------------|---|
| PP         | Polipropileno                             |
| PE         | Polietileno                               |
| EPP        | Polipropileno espumado                    |
| PP-g-MAH   | Anhídrido maléico                         |
| A-L-lisina | Arcilla bentonita modificada con L-lisina |
| G          | Grafito                                   |
| NTC        | Nanotubos de carbono                      |
| TGA        | Análisis termogravimétrico                |
| SEM        | Microscopia electrónica de barrido        |
| GPa        | Gigapascales                              |
| phr        | Partes por cien de resina                 |
| AC         | Azodicarbonamida                          |
| OBSH       | Bencenosulfonil Hidrazida                 |
| g          | Gramo                                     |

## Lista de Figuras

- Figura 1.1 Estructura de polímeros amorfos, semicristalinos y cristalinos.
- Figura 1.2 Dispersión de las nanopartículas en la matriz polimérica.
- Figura 1.3 Agentes espumantes químicos más comunes.
- Figura 1.4 Diferentes tipos de celdas: desde celdas cerradas hasta celdas potencialmente abiertas.
- Figura 1.5 Espuma de poliuretano de celda abierta y espuma de polietileno de baja densidad de celda cerrada.
- Figura 1.6 Principales etapas del proceso de espumación de una poliolefina.
- Figura 2.1 Estructura del polipropileno.
- Figura 2.2 Diagrama del proceso de Pemex para la obtención del propileno.
- Figura 2.3 Reacción del polipropileno.
- Figura 2.4 Configuraciones estereoquímicas del polipropileno.
- Figura 2.5 Proceso Slurry.
- Figura 2.6 Proceso Novolen.
- Figura 2.7 Proceso Spheripol.
- Figura 2.8 Estructura de la arcilla y sus formas laminares.
- Figura 2.9 Estructura del grafito.
- Figura 2.10 Representación esquemática de Nanotubos de carbono de pared simple y múltiple pared.
- Figura 2.11 Mecanismo de injerto de MAH sobre PP por extrusión reactiva.
- Figura 2.12 Comportamiento Esfuerzo-Deformación de los polímeros: frágil (curva A), plástico (curva B) y elevada elasticidad (elastómero) (curva C).

- Figura 2.13 Esquema de ensayo de flexión en tres puntos, de acuerdo a la norma ASTM D790-02.
- Figura 3.1 Características del molde utilizado.
- Figura 3.2 Distribución de tamaño de partícula del grafito.
- Figura 3.3 Extrusión de PP espumado con A-L-lisina, Grafito y NTC.
- Figura 3.4 Pruebas de Flexión al PP espumado con A-L-lisina, Grafito y NTC.
- Figura 4.1 Resistencia a la flexión vs. Espumante FPE-20 phr.
- Figura 4.2 Resistencia a la flexión vs. Espumante FPE-50 phr.
- Figura 4.3 Módulo de flexión vs. Espumante FPE-20 phr.
- Figura 4.4 Módulo de flexión vs. Espumante FPE-50 phr.
- Figura 4.5 Tenacidad vs. Espumante FPE-20 phr.
- Figura 4.6 Tenacidad vs. Espumante FPE-50 phr.
- Figura 4.7 Dureza vs. Espumante FPE-20 phr.
- Figura 4.8 Dureza vs. Espumante FPE-50 phr.
- Figura 4.9 Densidad vs. Espumante FPE-20 phr.
- Figura 4.10 Densidad vs. Espumante FPE-50 phr.
- Figura 4.11 (a) PP + Espumante FPE-20 + 5, celdas grandes.
- Figura 4.11 (b) PP + Espumante FPE-20 + 5, celdas pequeñas.
- Figura 4.12 (a) PP + Espumante FPE-20 +5 + A-L-lisina + MAH, celdas grandes.
- Figura 4.12 (b) PP + Espumante FPE-20 + 5 + A-L-lisina + MAH, celdas pequeñas.
- Figura 4.13 (a) PP + Espumante FPE-20 + 5 +NTC + MAH, celdas grandes.
- Figura 4.13 (b) PP + Espumante FPE-20 + 5 +NTC + MAH, celdas pequeñas.
- Figura 4.14 (a) PP + Espumante FPE-50 + 4, celdas grandes.
- Figura 4.14 (b) PP + Espumante FPE-50 + 4, celdas pequeñas.
- Figura 4.15 (a) PP + Espumante FPE-50 + 4 + A-L-lisina + MAH, celdas grandes.
- Figura 4.15 (b) PP + Espumante FPE-50 + 4 + A-L-lisina + MAH, celdas pequeñas.

Figura 4.16 (a) PP + Espumante FPE-50 + 4 + G + MAH, celdas grandes.

Figura 4.16 (b) PP + Espumante FPE-50 + 4 + G + MAH, celdas pequeñas.

Figura 4.17 (a) PP + Espumante FPE-50 + 4 + NTC + MAH, celdas grandes.

Figura 4.17 (b) PP + Espumante FPE-50 + 4 + NTC + MAH, celdas pequeñas.

### Lista de Tablas

Tabla 1.1 Clasificación de polímeros de acuerdo a sus propiedades térmicas.

Tabla 2.1 Propiedades del Polipropileno.

Tabla 2.2 Clasificación de las Arcillas.

Tabla 2.3. Comparación de propiedades.

Tabla 2.4 Propiedades físicas del Anhídrido Maléico.

Tabla 3.1 Muestras de PP con espumante.

Tabla 3.2 Muestras de PP con Espumante y Nanopartículas (carga).

Tabla 3.3 Muestras de PP con Espumante, Nanopartículas (carga) y MAH.

Tabla 4.1 Temperatura de comienzo de degradación y rapidez de degradación del espumante FPE-20 con cargas.

Tabla 4.2 Temperatura de comienzo de degradación y rapidez de degradación del espumante FPE-50 con cargas.

# Resumen

En el presente trabajo se estudio el efecto de dos agentes espumantes en una matriz de polipropileno con tres distintas cargas, las cuales fueron arcilla bentonita modificada químicamente con L-lisina, grafito y nanotubos de carbono. También se adicionó PP-g-MAH como compatibilizante entre el polipropileno y las cargas.

Se evaluaron diferentes concentraciones de espumante que van desde 0.5 hasta 5 phr, para determinar cómo afecta éste las propiedades mecánicas debido a la dispersión y tamaño de las celdas generadas. Los agentes espumantes que se utilizaron fueron SAFOAM FPE-20 y SAFOAM FPE-50, la diferencia entre estos dos es que el primero tiene un desprendimiento de gas de  $50 \pm 10$  ml / gr. y el segundo de  $100 \pm 10$  ml / gr.

Posteriormente se realizaron mezclas adicionando cargas y PP-g-MAH como agente compatibilizante.

Para determinar el efecto de las cargas y agentes espumantes se realizaron pruebas de flexión en tres puntos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas se realizó una selección de las mejores formulaciones y a éstas se les practicó análisis termogravimétrico y microscopia electrónica de barrido. Por medio de esta última técnica se pudo conocer el efecto de los espumantes y cargas en la estructura y tamaño de las celdas en la espuma.

# Objetivos

### Objetivo General

Determinar el efecto de partículas de arcilla-L-lisina, grafito, nanotubos de carbono y aditivos espumantes sobre propiedades fisicomecánicas de polipropileno (PP).

### Objetivos Particulares

- ❖ Evaluar el efecto de diferentes nanopartículas sobre las propiedades fisicomecánicas de polipropileno (PP).
- ❖ Determinar la morfología de las celdas producidas por los aditivos espumantes.
- ❖ Producir compuestos espumados con propiedades mejoradas, respecto al polipropileno (PP) espumado sin cargas.

# Hipótesis

El uso de nanopartículas, como arcilla, grafito y nanotubos de carbono, en polipropileno espumado permitirá que se obtengan mejores propiedades fisicomecánicas debido a la gran área de contacto entre las diferentes fases. Las partículas se encontrarán distribuidas y dispersas uniformemente en las paredes de las celdas del espumado haciéndolas más resistentes a esfuerzos externos.

# Introducción

Las espumas poliméricas son materiales que cuentan con una estructura de celdas cerradas. Estas espumas tiene amplias aplicaciones en aislamiento y envasado, en las industrias de automóviles, en productos que van desde productos para el hogar hasta utensilios para medicina, esto es debido a sus excelentes propiedades mecánicas. El proceso de formación de espuma es complicado y se rige por las interacciones entre los polímeros y agentes espumantes.

Un polímero espumado se caracteriza por una disminución de la densidad, esto es debido a la presencia de numerosos huecos o células dispersas en toda su masa. Estos polímeros espumados tienen grandes ventajas, como la reducción de peso, la absorción de energía y baja conductividad térmica. En particular las espumas hechas de poliolefinas mantienen las propiedades como dureza, flexibilidad y resistencia a los productos químicos y a la abrasión. El material más comúnmente utilizado para la producción de espumas de poliolefina es el polietileno (PE). Las ventajas de la espuma de PE son su buena estabilidad a la temperatura, alta resistencia química y procesamiento, también se puede utilizar a temperaturas más altas que la espuma de poliestireno.

Por otro lado, desde hace tiempo se espera que las espumas de polipropileno (PP) sea sustituto de otras espumas termoplásticas en aplicaciones industriales debido a sus propiedades funcionales de primera calidad y bajo costo de materia prima. El polipropileno (PP) es superior al polietileno (PE) en algunos aspectos por ejemplo, tiene una alta temperatura de fusión, tiene mayor rigidez, además la espuma de polipropileno (PP) puede ofrecer una buena estabilidad a la temperatura y alta resistencia química. Sin embargo, en los estudios que se han realizado las espumas de PP han presentado menores propiedades. Cuando la elasticidad en estado fundido es menor que el PP virgen, la pared celular de las

burbujas no puede ser lo suficientemente fuerte como para mantener la fuerza por tracción, y son propensos a romperse fácilmente. Como resultado, la espuma de PP generalmente tiene un alto contenido de celdas abiertas y calidad deteriorada.

Hoy en día existe cada vez un uso mayor de nanocompuestos poliméricos en las industrias, el objetivo principal se basa en obtener excelentes propiedades mecánicas de éstos. Durante los últimos cinco años las espumas de nanocompuestos de polímeros han recibido una atención creciente en las comunidades tanto científicas como industriales. Se ha demostrado que pequeñas cantidades de nanopartículas finamente dispersas pueden actuar como sitios de nucleación de burbujas durante el proceso de formación de espuma. La presencia de nanopartículas exfoliadas puede dar lugar a estructuras celulares más finas debido a la nucleación de burbujas. El tamaño nanométrico de las partículas también aumenta la interacción con la matriz del polímero, con la cual repercute en mejoras en propiedades mecánicas.

En este trabajo, el uso de nanopartículas de arcilla bentonita modificada con L-lisina, grafito y nanotubos de carbono, dieron como resultado módulos de flexión y resistencias a la flexión más altos, en comparación al material sin carga. Por lo tanto las propiedades específicas de las espumas y aplicaciones podrían ampliarse con la incorporación de pequeñas cantidades de nanopartículas.

# Capítulo I

## Antecedentes

### 1.1 Polímeros

Gran parte de los químicos y de los ingenieros químicos se hayan hoy en día involucrados en algún aspecto de la ciencia o de la tecnología de los polímeros, algunos han llamado a nuestro tiempo la era de los polímeros. La palabra *polímero* se deriva del griego *poli* que significa mucho y *meros* que significa partes. <sup>[1]</sup>

Los polímeros son grandes moléculas que están formadas por la unión de muchas unidades repetitivas. Generalmente, los polímeros involucran uniones covalentes entre los átomos de carbono que constituyen la columna vertebral de la cadena polimérica. <sup>[2]</sup>

Entre las propiedades únicas de los polímeros, se incluye la asociación por su gran tamaño lo que conduce a interacciones considerables por las longitudes considerables a lo largo de la cadena y de grandes superficies. El término polímero incluye a los polímeros naturales y a los sintéticos. Los polímeros sintéticos pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos, mientras que los naturales son comúnmente llamados biopolímeros. <sup>[2]</sup>

Los polímeros se utilizan en un gran número de aplicaciones dada su habilidad para fabricar materiales “a la medida” para satisfacer necesidades específicas. Por ejemplo el poli-cloruro de vinilo (PVC) que se usa para fabricar tuberías que se utilizan actualmente para plomería. El polietileno (PE) y polipropileno (PP) se utilizan para producir varios tipos de contenedores, envases y materiales para ductos. Las fibras son usadas en diversas aplicaciones que

incluyen a la industria textil y pueden ser producidas a partir de polímeros como el nylon o los poli-ésteres. <sup>[2]</sup>

Los elastómeros o hules tienen su aplicación en llantas, mangueras, cojinetes y empaques, los basados en poliuretano se usan para fabricar suelas en la industria del calzado y la automotriz en facias y salpicaderas. Los poliuretanos se usan también en la formulación de adhesivos. Las pinturas actuales base agua (en forma de látex) constan de diversos polímeros en donde la resistencia al agua es importante. Cabe mencionar que en la industria electrónica los polímeros son utilizados tanto por sus propiedades aislantes como por sus propiedades de semiconductores y magnéticas. <sup>[2]</sup>

Los polímeros se fabrican en varias formas tales como: plásticos sólidos, fibras, espumas, películas, recubrimientos y adhesivos. Estos materiales pueden ser duros o suaves, rígidos o flexibles, ahulados, o vidriosos. Pueden ser producidos como materiales porosos o no porosos. Más aún, pueden ser producidos como espumas de bajo peso o reforzadas con diversos materiales de relleno tales como metal, vidrio o fibras de carbón o naturales para mejorar sus propiedades mecánicas. <sup>[2]</sup>

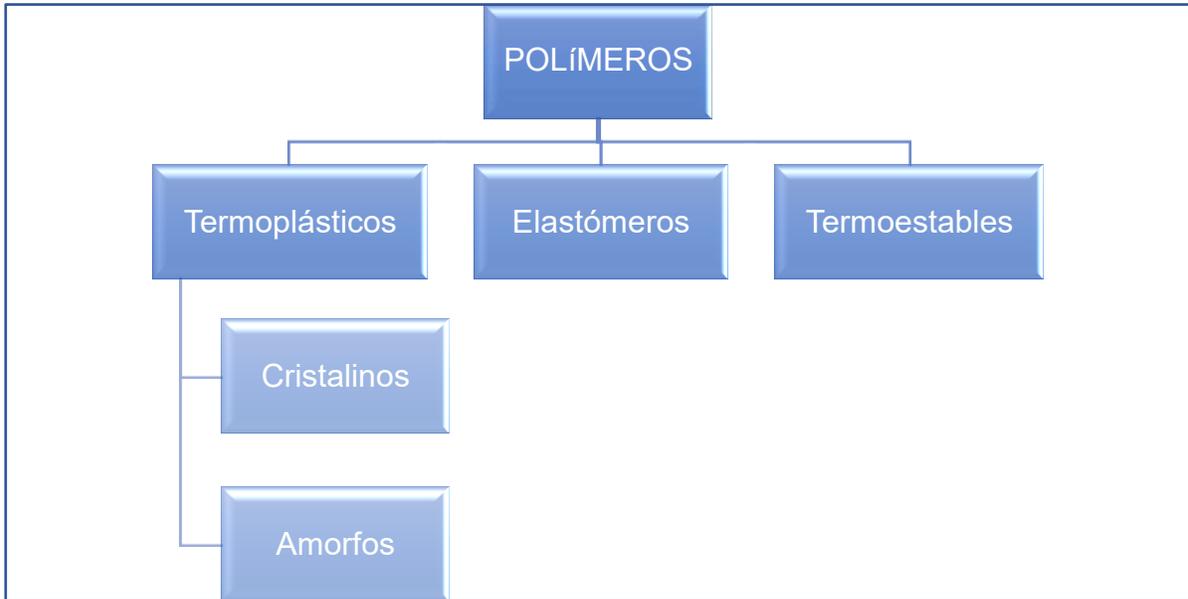
### 1.2 Clasificación de polímeros

Los polímeros se pueden clasificar de varias formas: primero, según la manera en que las moléculas son sintetizadas (adición, condensación), en función de su estructura molecular (lineales, en bloques, etc.). <sup>[3]</sup>

La forma más común de clasificar a los polímeros es en función de su comportamiento térmico y su morfología, como se muestra en el siguiente esquema:

# CAPITULO I - Antecedentes

Esquema de clasificación de polímeros en función de su comportamiento térmico y su morfología.



La Tabla 1.1 muestra las tres clases de polímeros, según su clasificación térmica junto con una descripción de su estructura.

*Tabla 1.1 Clasificación de polímeros de acuerdo a sus propiedades térmicas.*

| COMPORTAMIENTO | ESTRUCTURA GENERAL                              |
|----------------|---|
| Termoplástico  | Cadenas lineales flexibles                      |
| Termoestable   | Red rígida tridimensional                       |
| Elastómero     | Cadenas lineales flexibles con enlaces cruzados |

## I. Termoplásticos

Estos polímeros no presentan entrecruzamiento químico entre sus moléculas por esta razón al calentar el polímero tiende a reblandecerse y a fluir

como un líquido viscoso. La mayoría de los materiales termoplásticos pueden moldearse varias veces aunque esto afecta y genera una degradación en sus propiedades térmicas y mecánicas. Cuanto más largas sean las cadenas, más alto será el grado de entrelazamiento físico y el material tendrá mayor rigidez.

Los termoplásticos pueden ser moldeados en casi cualquier forma utilizando técnicas de procesamiento tales como moldeo por inyección y extrusión, y ahora constituyen, con mucho, la mayor proporción de los polímeros en la producción comercial.<sup>[4]</sup>

Existe una temperatura definida a la que las cadenas adquieren suficiente energía para comenzar a moverse unas con respecto a otras. Esta temperatura es la temperatura de transición del estado vítrio al fluido, conocida con las siglas  $T_g$ , por su nombre en inglés “*glassy temperature*”. Los polímeros termoplásticos son rígidos por debajo de la  $T_g$  y deformables por encima de esta temperatura. Es importante tener presente que si la aplicación del polímero exige que posea rigidez a temperatura (por ejemplo, si va a utilizarse para construir tuberías o envases) debe cumplirse que la  $T_g$  sea mayor que la  $T$  ambiente.<sup>[3]</sup>

### **Temperatura de Transición Vítre**

Es la temperatura a la cual aparecen cambios sustanciales en la textura física del material que, de un material vítreo y denso, se pasa a un material flexible, blando y de naturaleza elástica.

Cuando se enfría la masa fundida de un polímero, se hace más viscoso y fluye con menos facilidad. Si el polímero no es capaz de cristalizar y se reduce la temperatura lo suficientemente baja, se hace de caucho y luego como la temperatura se reduce aún más, se convierte en un vaso de polímero relativamente duro y elástico. La temperatura a la que el polímero se somete a la formación de un caucho a un vaso se conoce como la temperatura de transición

vítrea,  $T_g$ . Cualquier material que puede ser enfriado suficientemente por debajo de su temperatura de fusión sin cristalizar se someterá a una transición vítrea. <sup>[4]</sup>

### II. Elastómeros

En los elastómeros, también conocidos como hules o caucho, las distintas cadenas que forman el polímero están entrelazadas en un bajo porcentaje a otras por enlaces químicos.

Esta estructura peculiar es la que proporciona elasticidad al material. Las cadenas pueden ser deformadas ante un esfuerzo extremo pero tenderán a volver a su estado inicial, se pueden estirar fácilmente a altas extensiones (por ejemplo hasta 10 veces sus dimensiones originales) y recuperan rápidamente sus dimensiones originales cuando se libera la tensión aplicada. Esta propiedad extremadamente importante y útil es un reflejo de su estructura molecular en la que la red es de baja densidad de reticulación. <sup>[4]</sup>

En los polímeros termoplásticos, al no existir estas uniones entre cadenas por encima de  $T_g$ , una vez deformados no regresan a su estado inicial. <sup>[3]</sup>

### III. Termoestables o Termofijos

Este tipo de polímeros es un caso extremo de los elastómeros. El grado de entrecruzamiento es tan alto que la estructura permanece rígida. Es decir, son materiales que una vez calentados reaccionan irreversiblemente, de manera que las aplicaciones subsecuentes de calor y de presión no provocan que se ablanden y fluyan. En estos tipos de polímeros carece de sentido hablar de una  $T_g$ . Las cadenas solo tendrán movimiento cuando los enlaces químicos se rompan, lo cual quiere decir que habrá que destruir el polímero para hacer que éste fluya. <sup>[3]</sup>

### 1.3 Polímeros Cristalinos y Amorfos

La morfología de los polímeros se refiere al arreglo espacial y orientación de las cadenas de polímeros. Una de las atribuciones morfológicas más importantes del polímero es el grado de cristalinidad. La mayoría de los polímeros sintéticos tiene arreglo semicristalino, esto indica que tienen ambas regiones tanto cristalinas como amorfas. <sup>[5]</sup>

Los polímeros cristalinos se caracterizan por tener regiones bien ordenadas de forma paralela, alineada o cadenas alineadas. El arreglo regular que tienen puede ser helicoidal, zig-zag o plana. Las cadenas de polímero desordenadas o desalineadas dan lugar a una región amorfa en la matriz polimérica. Algunos polímeros sintéticos son semicristalinos. <sup>[5]</sup>

Los polímeros amorfos en masa están constituidos por cadenas poco ordenadas o menos cristalina. <sup>[1]</sup> Un polímero amorfo es transparente a la vista porque las cadenas están distribuidas de una manera arbitraria y no presentan obstáculos donde la luz pueda ser reflejada. Por otro lado, si se le aplica un poco de deformación a un polímero cristalino, éste va a presentar una rápida respuesta elástica como resultado de la elongación producida. Como consecuencia, los polímeros cristalinos presentan un alto módulo aunque la deformación está limitada aproximadamente al 1 %. Esto se debe a que la estructura sólo tiene una forma de disipar el esfuerzo aplicado y es por medio de una ruptura, haciendo que el material sea propenso a quebrarse. <sup>[6]</sup>

La densidad y peso molecular de un polímero cristalino es mayor que la de un polímero amorfo, ya que las cadenas de la estructura cristalina están más empaquetadas. En la Figura 1.1 se puede observar la representación de las distintas regiones.



Figura 1.1 Estructura de polímeros amorfos, semicristalinos y cristalinos.

### 1.4 Nanocompuestos

Se denomina nanocompuesto a los materiales conformados por 2 o más componentes en los cuales al que se encuentra en mayor porcentaje, se le denomina matriz y al de menor porcentaje carga.

En las últimas dos décadas se empezaron a utilizar nanopartículas para alterar las propiedades de los polímeros ya que las tendencias demuestran que cuando se procesan correctamente y se agregan pequeñas cantidades de nanopartículas, incrementan las propiedades mecánicas y térmicas de los polímeros. En un nanocompuesto al menos uno de los materiales se encuentra en escala nanométrica, esto quiere decir de  $10^{-9}$  m. [7]

Los nanocompuestos basados en polímeros han demostrado una gran creciente atracción en los campos académicos e industrial, debido principalmente por la mejora de las propiedades mecánicas. Esta mejora de propiedades se debe a la dispersión de partículas de tamaño nanométrico. En general y dependiendo del tipo de matriz polimérica, se usa entre el 1 % y 5 % de carga. [8]

Para realizar un proceso de optimización se debe incluir adecuadamente la dispersión de las nanopartículas en la matriz polimérica. En la Figura 1.2 se muestra las diferencias entre aglomeración, intercalación y exfoliación en los

## CAPITULO I - Antecedentes

sistemas. Una buena dispersión y es aún mejor la intercalación entre las nanopartículas y la matriz polimérica. [7]

Así, la presencia de nanopartículas exfoliadas pueden dar lugar a estructuras celulares más finas debido a la nucleación de burbujas, el tamaño nanométrico de las partículas ayuda mucho en la interacción con la matriz polimérica. [9]

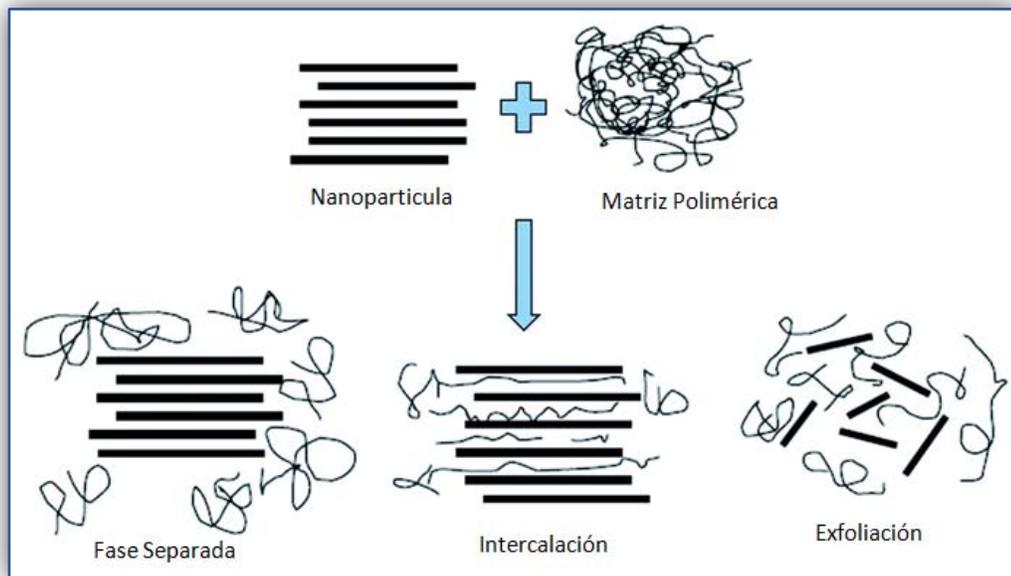


Figura 1.2 Dispersión de las nanopartículas en la matriz polimérica.

Dentro de los compuestos comúnmente utilizados como nanopartículas se destacan: arcillas, nanotubos de carbono, negro de humo o negro de carbón. En el caso de los materiales poliméricos, las nanopartículas, comúnmente, utilizadas son arcillas y esto es debido a su bajo costo, además permiten una buena exfoliación dentro de la matriz polimérica.

Dependiendo de la naturaleza de la matriz los nanocompuestos se puede clasificar como poliméricos, metálicos o cerámicos.

Los nanocompuestos de polímero-arcilla son relativamente una nueva clase de materiales, que pueden presentar mejores propiedades mecánicas, térmicas, de barrera, conductividad iónica y retardancia a la flama. <sup>[10]</sup>

### 1.5 Espumantes

Las espumas son materiales celulares que contienen burbujas de gas. Se pueden fabricar por varios tipos, que van desde rígidas hasta las de textura muy blanda. Las espumas rígidas de alta densidad se están usando cada vez más en las industrias de fabricación de muebles y aparatos domésticos. En general las espumas rígidas consisten de celdas cerradas y de las espumas flexibles son celdas abiertas. <sup>[11]</sup>

Las espumas plásticas pueden obtenerse de tres maneras

1. Por medio de subproductos gaseosos de la reacción de polimerización.
2. Por la vaporización de un líquido de bajo punto de ebullición. y
3. Usando la reacción química de un agente espumante secundario, que se activa con el calor.

La mayoría de los plásticos de alto desempeño pueden espumarse ya sea mezclando un gas o usando un agente químico. El método de proceso más usual es el moldeo por inyección; sin embargo, también existen técnicas de extrusión comerciales. Este proceso se usa en la actualidad para fabricar un gran número de piezas que van desde gabinetes para computadoras y aparatos domésticos hasta floreros. <sup>[11]</sup>

Este nuevo proceso de espumas rígidas fue desarrollado en Alemania y se ha convertido en el proceso comercial más importante para producir espumas rígidas de poliolefinas.

Las Espumas Poliolefinicas son materiales expandidos de interés comercial en la industria, por su flexibilidad, eficiencia para el aislamiento térmico, acústico, eléctrico y de humedad, por sus posibilidades de coloreado, adecuada dureza, resistencia química y peso ligero fácilmente termoformable, no corrosivo y no abrasivo. <sup>[12]</sup>

La combinación de tecnologías de espumado y polímeros que contienen cargas nanométricas da lugar a una nueva clase de materiales celulares: nanocompuestos poliméricos celulares. <sup>[13]</sup>

Estos materiales además de “heredar” todas las mejoras que se consiguen en los nanocompuestos poliméricos sólidos, presentan estructuras celulares mejoradas ya que las nanopartículas también son capaces de actuar en el proceso de nucleación y crecimiento de las celdillas. Se puede afirmar por tanto que las nanopartículas tienen un papel multifuncional cuando se añaden a un material celular polimérico. En algunos casos, la presencia de las nanopartículas hace que en el nanocompuesto espumado se detecte un mayor incremento de algunas propiedades que en el correspondiente material sólido. <sup>[13]</sup>

### 1.5.1 Clasificación de Agentes Espumantes

Se distingue entre dos tipos de agentes espumantes:

#### I. Agentes espumantes físicos

Son gases inertes como el CO<sub>2</sub> o el N<sub>2</sub> que se disuelven en el polímero en estado fundido mediante la aplicación de una alta presión, formándose la estructura celular al reducir dicha presión. También se utilizan líquidos de bajos puntos de ebullición como por ejemplo clorofluorocarbonos, metileno, cloruro de metileno, pentano e isobutano, que dan lugar a la estructura celular cuando se les somete a temperaturas por encima de sus puntos de ebullición. <sup>[14]</sup>

Los gases inertes tales como el  $\text{CO}_2$  o el  $\text{N}_2$  presentan algunas ventajas respecto a los anteriores. Son baratos, abundantes y en cierta forma los más amigables con el medio ambiente. <sup>[13]</sup>

### II. Agentes espumantes químicos

Estos compuestos son aditivos que cuando se calientan por encima de una determinada temperatura (temperatura de descomposición) se descomponen dando lugar a un gas. El agente espumante químico puede dividirse en agente orgánico y agente inorgánico.

Los agentes espumantes inorgánicos usualmente son el bicarbonato de sodio, bicarbonato de amonio, etc. Respecto a los agentes espumantes orgánicos existe una gran variedad de ellos pero deben de cumplir con algunos requisitos como son: que el tiempo de liberación de gas sea corto, el tamaño de partícula se pequeña y homogénea así como fácil de dispersar, que tenga una gran capacidad de formación de espuma y una alta velocidad de reacción. En la Figura 1.3 se muestran los agentes espumantes químicos más comunes. <sup>[14]</sup>

| Agente Espumante       | Formula Química | Temperatura de Descomposición (°C) |
|------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Azodicarbonamida (AC)  |                 | 195-210                            |
| DMAD, DEAD, DIAD, etc. |                 | 100-200                            |
| BaAC                   |                 | 245                                |
| OBSH                   |                 | 157-160                            |
|                        |                 | 213-225                            |
| Derivados de Urea      |                 | 210-222                            |
|                        |                 | 235-240                            |

*Figura 1.3 Agentes espumantes químicos más comunes.*

## 1.5.2 Estructura Celular de las Espumas

Un material celular polimérico es una estructura de dos fases en la cual una fase gaseosa procedente de un agente espumante, bien sea físico o químico, se ha dispersado a lo largo de una matriz polimérica sólida. Cada proceso puede dar lugar a espumas de celda abierta o cerrada.

Las espumas con estructura celular abierta es donde el gas puede circular libremente entre las celdillas ya que estas están interconectadas, o también se pueden encontrar estructuras celulares de celda cerrada, en los cuales el gas está ocluido en el interior de las celdas. <sup>[13]</sup>

En la Figura 1.4 se muestra el esquema de una estructura celular abierta así como la estructura celular cerrada.

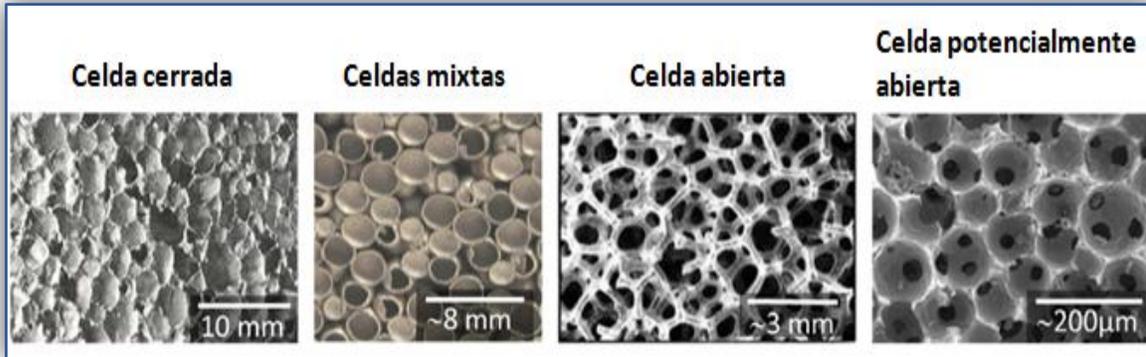


Figura 1.4 Diferentes tipos de celdas: (de izquierda a derecha) desde celdas cerradas hasta celdas potencialmente abiertas.

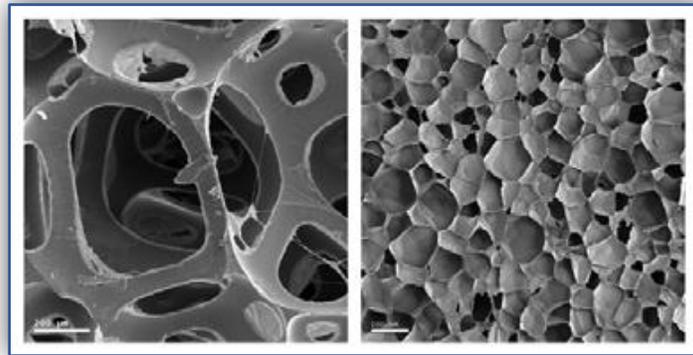


Figura 1.5 Espuma de poliuretano de celda abierta (izquierda) y espuma de polietileno de baja densidad de celda cerrada, (derecha).

Una distribución no uniforme de tamaños de celda a lo largo del material afecta de forma negativa a las propiedades del mismo. Por ejemplo, las propiedades mecánicas de un material con una distribución de tamaños de celda no homogénea son inferiores a las de un material con una distribución de tamaños de celda homogénea. En el primero de los casos, la fracción de masa sólida no estaría distribuida de forma homogénea, lo que implicaría que los esfuerzos a los que pueda estar sometido el material no se propaguen de la misma forma a lo

largo de todo el volumen del mismo, o que la propagación de grietas y “cracks” se vea favorecida en zonas con menor fracción de material sólido. <sup>[13]</sup>

El proceso de formación de la espuma de un polímero comprende tres pasos principales; nucleación celular, el crecimiento celular y coalescencia de las celdas, lo que estabiliza la estructura de la célula. <sup>[15]</sup>

La nucleación, o la formación de burbujas expandibles puede comenzar dentro de una masa fundida de polímero que ha sido sobresaturada con el agente espumante. Una vez nucleada, una burbuja continúa creciendo a medida que el agente de expansión se difunde en ella. Este crecimiento continuará hasta que la burbuja se estabiliza. Cuando las células son nucleadas, la densidad de la espuma disminuye a medida que las moléculas del agente espumante disponibles se difunden en las células. <sup>[16]</sup> En la Figura 1.6 se observa las principales etapas del proceso de espumación de una poliolefina.

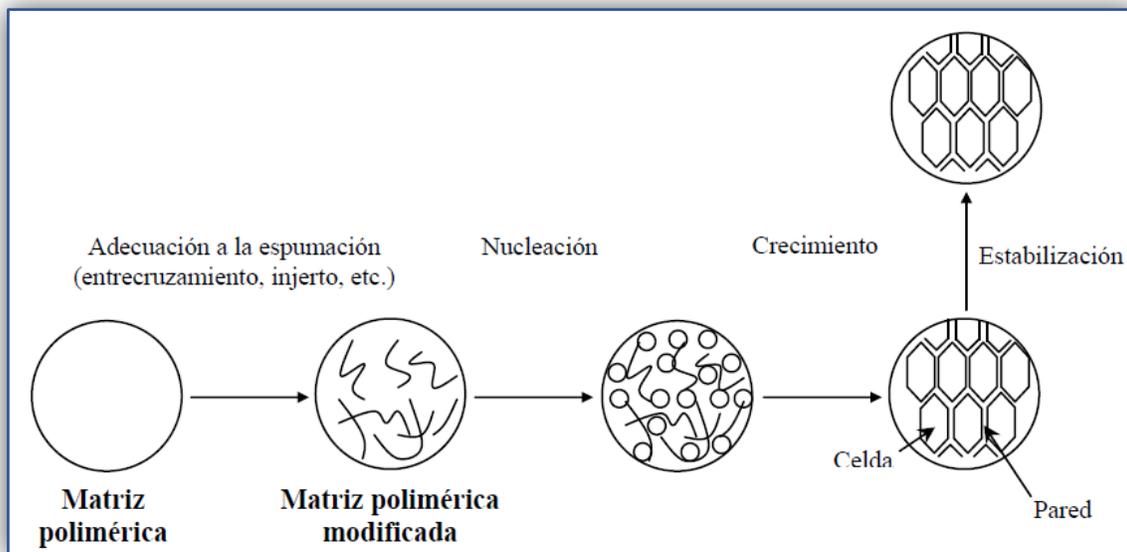


Figura 1.6 Principales etapas del proceso de espumación de una poliolefina.

## Capítulo II

### Generalidades

#### 2.1 Polipropileno (PP)

La estructura básica del polipropileno se muestra en la Figura 2.1, el polipropileno se utiliza básicamente en un 30 % para productos de fibra, un 15 % en artículos para el hogar y juguetes, un 15 % para partes automotrices y un 5 % en piezas para electrónicos. La polimerización catalítica del propileno fue descubierta por el italiano Giulio Natta en 1954. <sup>[17]</sup>

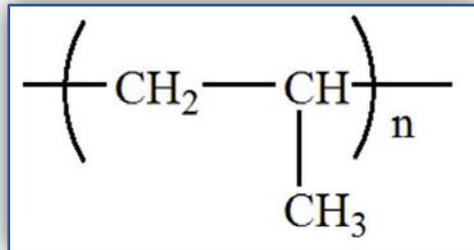


Figura 2.1 Estructura del polipropileno.

El Polipropileno (PP) es un termoplástico que pertenece a la familia de las poliolefinas y se obtiene a través de la polimerización del propileno. <sup>[18]</sup> Además el polipropileno es muy versátil ya que tiene un buen equilibrio de resistencia térmica y química, excelentes propiedades mecánicas y eléctricas, así como facilidad de procesamiento. <sup>[19]</sup>

El polipropileno es un polímero semicristalino y es importante tomar en cuenta que las propiedades mecánicas del polipropileno varían de manera significativa esto es por la forma en cómo es utilizado y procesado. <sup>[20]</sup>

## CAPITULO II - Generalidades

La materia prima para la polimerización del polipropileno es el propileno que se obtiene a partir de la petroquímica. Este monómero, obtenido de los procesos de refinación, es de alta pureza (mayor que 99.5 %).<sup>[19]</sup> En México en Petróleos Mexicanos lo obtiene por el siguiente proceso<sup>[18]</sup>:

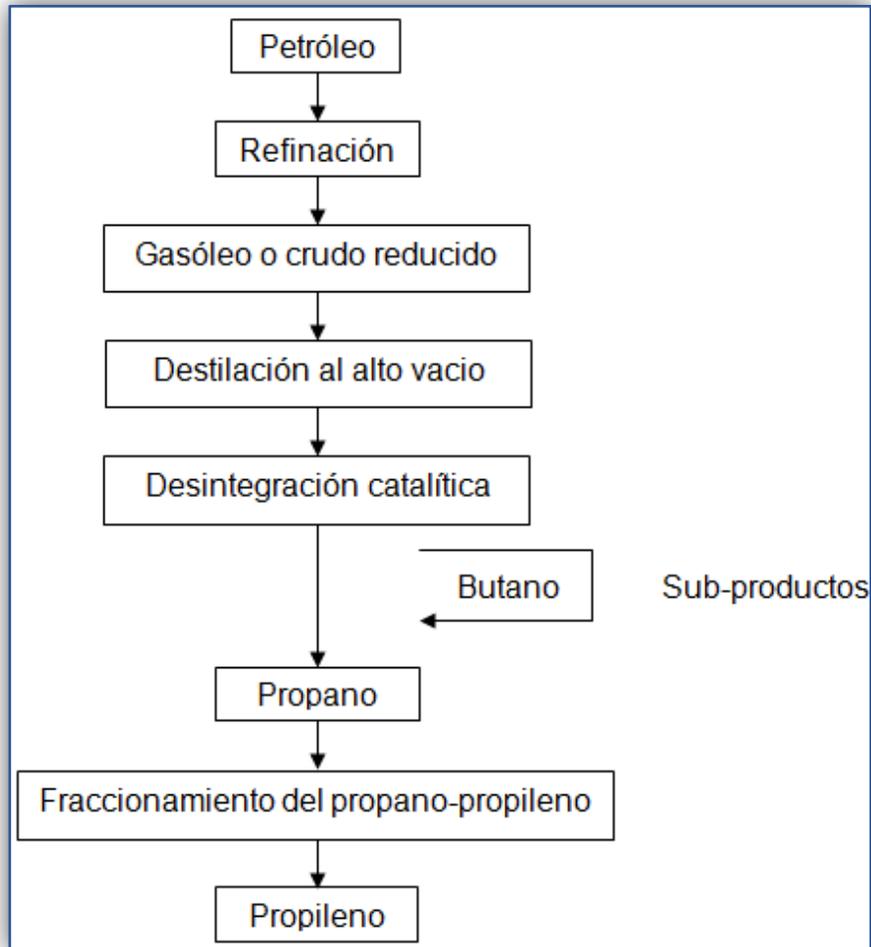


Figura 2.2 Diagrama del proceso de PEMEX para la obtención del propileno.

El polipropileno es sintetizado a partir del monómero propileno bajo condiciones controladas de presión y temperatura, en presencia de metales de transición que sirven como catalizadores.<sup>[18]</sup>



Figura 2.3 Reacción del polipropileno.

### 2.1.1 Características

El polipropileno puede tener diferentes configuraciones estereoquímicas, existen tres tipos de polipropileno: Atáctico, Isotáctico y Sindiotáctico.

En el caso del polipropileno atáctico los grupos de metilo tienen un orden aleatorio en la cadena polimérica. En el polipropileno isotáctico, los grupos metilo se encuentran en un solo lado de la cadena polimérica, mientras que en el polipropileno sindiotáctico, los grupos metilo se encuentran alternados a lo largo de toda la matriz polimérica, como se muestra en la Figura 2.4

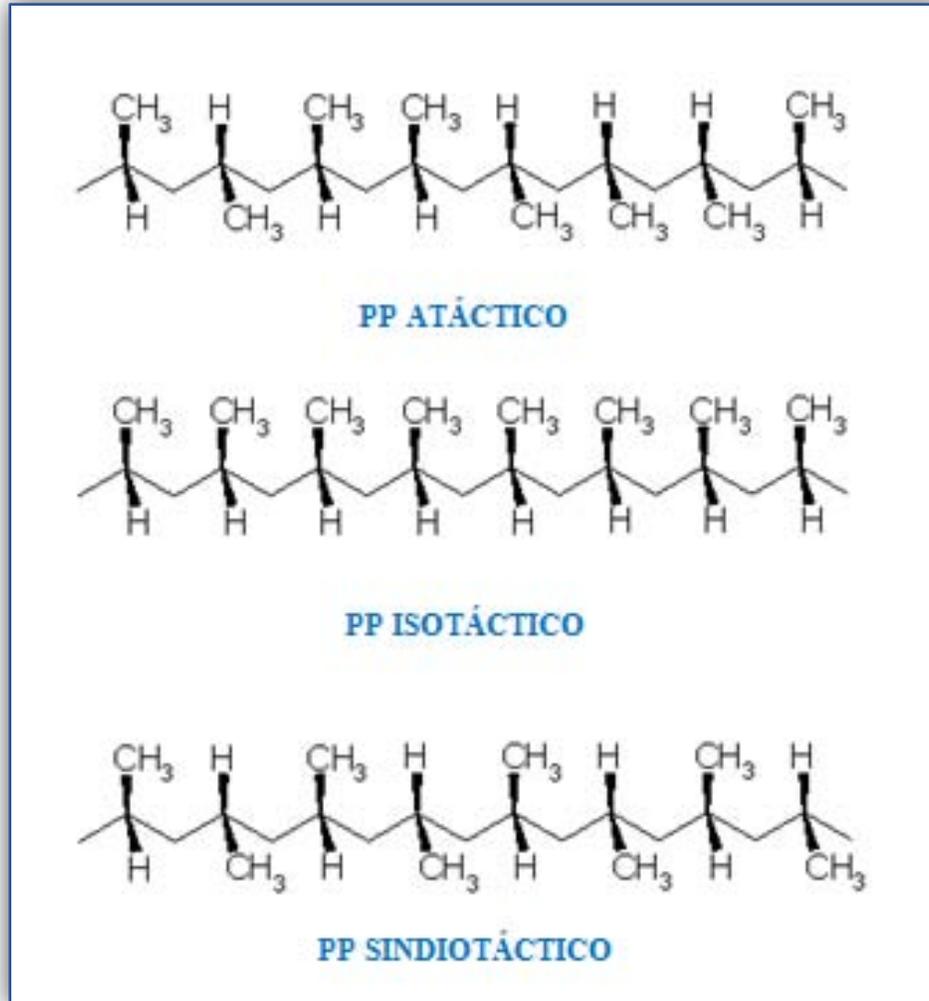


Figura 2.4 Configuraciones estereoquímicas del polipropileno.

Al tener los grupos metilo diferente configuración, cambian las propiedades mecánicas y reactivas del polímero. Por ejemplo; el polipropileno isotáctico tiene una buena resistencia a los solventes, es fácil de orientar, presenta una mayor rigidez, un mayor punto de fusión y una mayor temperatura de transición vítrea (comparado con otras poliolefinas comunes).<sup>[21]</sup>

Las configuraciones estereoregulares del polipropileno son semicristalinas; mientras que el atáctico no lo es. El polipropileno más común, comercialmente, es el polipropileno isotáctico, esto es por su alta cristalinidad.<sup>[21]</sup>

Las formas isotáctica y sindiotáctica tienden a adquirir en estado sólido una disposición espacial ordenada, semicristalina, que le confiere una mejora con respecto al atáctico en las propiedades físicas, térmicas y mecánicas principalmente, el PP isotáctico es el más empleado en la industria. En este trabajo se utilizara el polipropileno isotáctico del cual se describes sus principales propiedades en el punto 2.1.2.

### 2.1.2 Propiedades del Polipropileno Isotáctico

#### I. Propiedades Físicas <sup>[18, 22]</sup>

- Densidad: entre 0.89 y 0.91 g/cm<sup>3</sup>. Por ser tan baja permite la fabricación de productos ligeros.
- Índice de Fluidez: es una medida indirecta del peso molecular del material, a medida que es menor este valor, el peso molecular es mayor y la rigidez de la pieza es elevada. En cambio si el índice de fluidez es elevado, el peso molecular es menor y la viscosidad disminuye.  
Sin embargo, cuando el polímero se encuentra en formulaciones con lubricantes la medición del índice de fluidez no es comparable con aquellos polímeros sin lubricantes, esto indica que a mayor cantidad de lubricante el índice de fluidez es mayor a pesar de que el peso molecular del polímero no se modifica.
- Absorción de agua: no absorbe humedad, incluso en ambientes altamente húmedos, esto ayuda e evitar un secado previo para procesarlo.
- Contracción de Moldeo: la contracción del polipropileno en el molde es menor que la que sufre el polietileno y depende fundamentalmente de la temperatura de molde, temperatura de fundido y temperatura de enfriamiento.

El intervalo de contracción del molde para polipropileno es de 1 a 2% y debe tomarse en cuenta durante el diseño del molde.

### II. Propiedades Mecánicas <sup>[18, 22]</sup>

Estas se encuentran en función del peso molecular y del grado de cristalinidad.

- Resistencia a la Tensión: Tiene un valor medio comparado con los demás termoplásticos. Esta propiedad depende de la isotacticidad del polipropileno, a medida que aumenta esta estructura, aumenta la cristalinidad, el punto de reblandecimiento, la rigidez, resistencia a la tracción, módulo de tensión y dureza.
- Elongación Tiene un excelente rango entre 400 y 430 % utilizando cargas de 300 y 400 MPa. Esta propiedad es útil para la fabricación de películas, y que sea posible su estiramiento en dirección paralela y transversal.
- Resistencia al Impacto: se encuentra entre 6.8 y 8.16 J/m.
- Resistencia la Flexión: El polipropileno es un material semi-rígido, su resistencia es de 600 MPa. Se utiliza en la fabricación de carcasas de aparatos, cajas y contenedores de alimentos.
- Módulo de Flexión: Medida de rigidez del material. La presencia de los grupos estereoregulares en el polipropileno proporciona una gran rigidez con respecto al polietileno, incluso por encima de los 100°C.
- Resistencia a la Compresión: Esta propiedad indica la carga que soporta un plástico antes de deformarse. El polipropileno presenta un valor de 500 MPa.

### III. Propiedades Térmicas <sup>[18, 22]</sup>

- Temperatura de Reblandecimiento Vicat: presenta resistencia a las temperaturas por arriba de 140°C por periodos cortos sin deformarse.

- **Temperamento de Deformación bajo carga:** este material a 100°C soporta 4.5 MPa y a 55°C soporta 18.5 MPa. En caso de reforzar el polipropileno con cargas como fibra de vidrio, talco o carbonato de calcio, la temperatura aumenta hasta 150°C.
- **Conductividad Térmica:** presenta un valor muy pequeño de conductividad respecto a otros polímeros y metales, ya que el calor que absorbe lo transmite lentamente.
- **Resistencia al Calor Continuo:** Es la capacidad que presentan los plásticos para soportar elevadas temperaturas libres de esfuerzos mecánicos. El propileno es el material que más resistencia posee con respecto a las poliolefinas.
- **Calor Específico:** es la cantidad de calor que se necesita para elevar un grado centígrado la temperatura de un material por unidad de peso. El polipropileno presenta un valor elevado de calor específico comparado con las demás poliolefinas, consumiendo más energía para su transformación y enfriamiento.

#### IV. Propiedades Ópticas <sup>[18, 22]</sup>

El polipropileno por naturaleza es traslucido y su transmitancia es de 70 a 75 %. A pesar de poseer una transmitancia pobre, esta pasa a valores de 90-92 % en el caso de película cuando es biorientada (por ejemplo, empaque de golosinas, cigarrillos, etc.) y de 87 a 90 % en recipientes soplados cuando se emplean agentes clarificantes. La estereoregularidad afecta igualmente la transparencia debido a que se forman pocos cristales.

#### V. Propiedades Eléctricas <sup>[18, 22]</sup>

La constante dieléctrica es la capacidad de los materiales plásticos para almacenar la energía dentro de ellos. El polipropileno es un material que casi no acumula energía, por eso puede ser utilizado en circuitos

eléctricos y electrónicos. Su principal desventaja química es que el cobre y otros metales catalizan su descomposición sobre todo en los carbonos terciarios, y físicamente a temperaturas por debajo de los  $-10^{\circ}\text{C}$  se vuelve un plástico frágil.

### VI. Propiedades Químicas <sup>[18, 22]</sup>

Por tener una naturaleza apolar posee gran resistencia a agentes químicos. Presenta excelente resistencia a los ácidos y bases fuertes o débiles; solo lo ataca el ácido nítrico concentrado por arriba de los  $80^{\circ}\text{C}$ . Pocos disolventes orgánicos como el xileno pueden disolverlo a temperaturas mayores a la ambiente.

Tabla 2.1 Propiedades del Polipropileno

| Propiedades                   | Polipropileno |                                       |
|-------------------------------|---------------|---------------------------------------|
|                               |               | Unidades                              |
| Densidad                      | 0.89-0.91     | $\text{g/cm}^3$                       |
| Cristalinidad                 | 60-80         | %                                     |
| Resistencia a la Tención      | 300-400       | $\text{Kg/cm}^2$                      |
| Elongación                    | 500-700       | %                                     |
| Módulo Elástico               | 11-18         | $1 \times 10^3 \text{ Kg/cm}^2$       |
| Dureza                        | 85-95         | $1 \times 10^3 \text{ Kg/cm}^2$       |
| Conductividad Térmica         | 3.3           | $1 \times 10^4 \text{ Cal cm/s cm}^2$ |
| Temp. reblandecimiento Vicat  | 140-160       | $^{\circ}\text{C}$                    |
| Temperatura de Fusión         | 170-175       | $^{\circ}\text{C}$                    |
| Temp. de Transición Vítrea    | -10           | $^{\circ}\text{C}$                    |
| Temperatura de Cristalización | 116           | $^{\circ}\text{C}$                    |
| Entalpia de Cristalización    | 96            | $\text{J/mol}$                        |
| Contracción por Moldeo        | 1.8           | %                                     |

### 2.1.3 Procesos de Producción

La polimerización es una reacción química mediante la cual un conjunto de moléculas de bajo peso molecular (monómeros) se une químicamente para formar una molécula de gran peso (polímero).

El polipropileno se obtiene de diferentes procesos de polimerización. A continuación se mencionaran los utilizados. Se clasifican dependiendo del medio de reacción y de la temperatura de operación, en 3 tipos:

#### **I. Polimerización en Suspensión**

El uso del procedimiento de polimerización en disolvente (Slurry) está experimentando una reducción drástica en su uso hasta el punto de obsolencia, debido principalmente a la falta de rentabilidad; que es atribuible a su incompatibilidad con la última generación del sistema de catalizador. <sup>[22]</sup> Sin embargo éste era uno de los procesos más utilizados en forma industrial.

La reacción de polimerización ocurre dentro de un reactor continuamente agitado, a temperaturas menores de 90°C y a alta presión. Se utiliza un disolvente, generalmente heptano como medio de reacción, por lo que el producto se obtiene en forma de una suspensión. La suspensión debe contener entre un 10 y 20 % de partículas sólidas de polímero. Estas pasan a un secador flash para remover el propileno que no reaccionó y el disolvente. En el proceso convencional, el residuo de catalizador es desactivado y disuelto agregando un compuesto polar mezclado con ácido clorhídrico.

El disolvente utilizado debe tener afinidad con el propileno respecto a su solubilidad, ser inerte con el sistema catalítico, debe poseer un alto punto de ebullición y en general debe poseer características que favorezcan la reacción <sup>[22]</sup>

## CAPITULO II - Generalidades

Dentro de este tipo de procesos existen marcadas diferencias en la configuración de los reactores (de tipo bucle o autoclave) y en el tipo de diluyente utilizado, lo que afecta a las características de la operación y al rango de productos que se puede fabricar. Estos procesos trabajan a presiones mayores que el proceso en solución. [23]

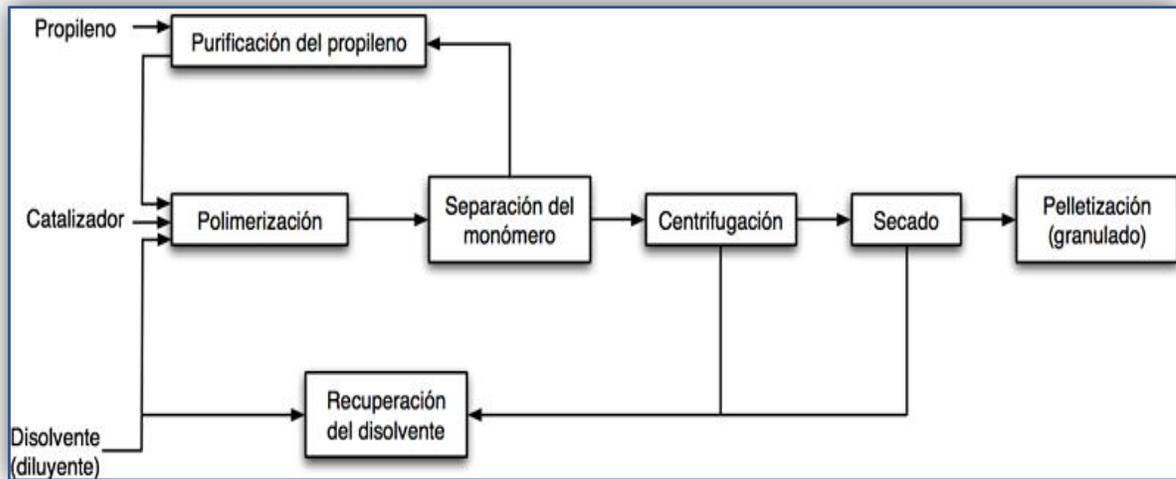


Figura 2.5 Proceso Slurry.

### II. Polimerización en Fase Gaseosa

Este proceso tiene mayor control de tamaño en la partícula ya que utiliza catalizadores de tercera y cuarta generación que son más estereoespecíficos. Con este proceso se logra obtener un mayor grado de pureza. [24]

Este proceso se conoce como Novolen, consiste en dos reactores en serie. El propileno, el etileno y/o alguno de los demás monómeros utilizados se alimentan al primer reactor. Se agrega hidrógeno para controlar el peso molecular. Se eligen las condiciones de polimerización (temperatura, presión y concentración de los reactivos) dependiendo del grado que se desee producir. La reacción es exotérmica, y la evaporación de los líquidos en la polimerización asegura que el

## CAPITULO II - Generalidades

intercambio de calor es extremadamente eficiente. El polvo de polipropileno se descarga desde el reactor y se separa en un tanque de descarga a presión atmosférica. El monómero sin reaccionar se separa del polvo y se comprime, y finalmente se recicla. [22]

El polímero se pone en contacto con nitrógeno en un tanque de purga para despojarlo del propileno residual. El gas de purga se recupera, el polvo se transporta a los silos de polvo, y posteriormente por extrusión se convierte en pellets, donde se incorpora una gama completa de aditivos bien dispersados. [22]

Este proceso no utiliza disolvente, lo cual ayuda a tener tiempos de residencia de cuatro horas y ayuda a alcanzar una eficiencia del 99 %. [22]

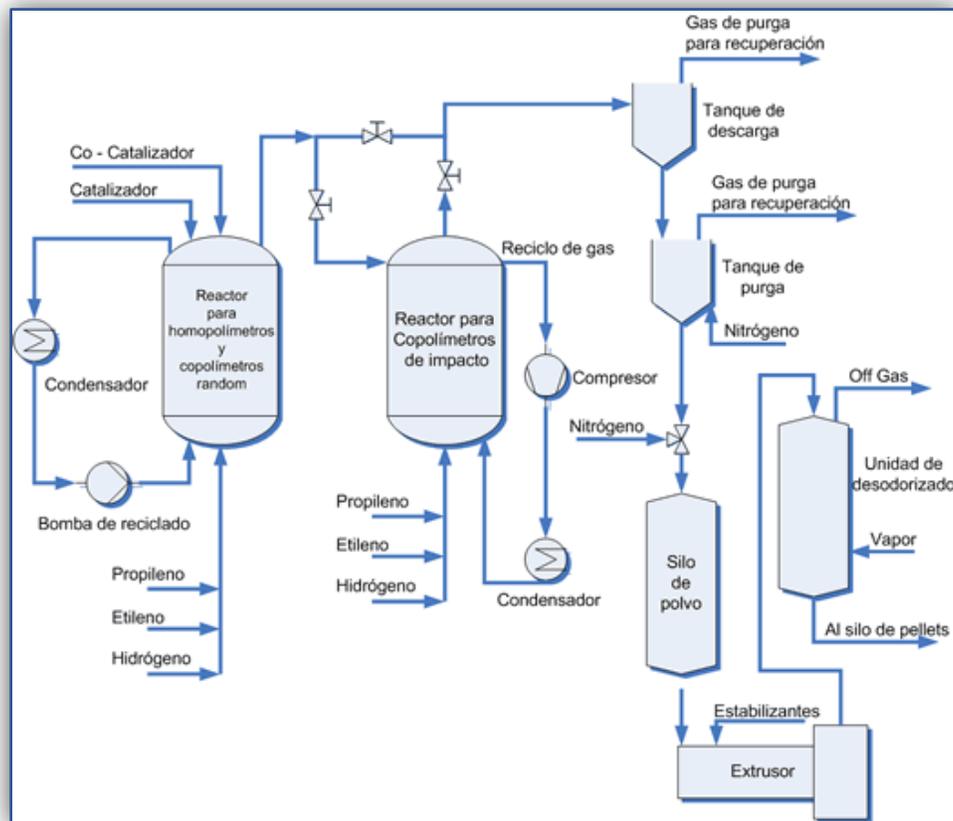


Figura 2.6 Proceso Novolen.

### III. Polimerización en Solución

El proceso Spheripol de Himont combina la polimerización primero para trabajar en suspensión en reactores de bucle tubulares con polimerización en fase gas, Es diseñado como híbrido con dos reactores en serie, y es el proceso de licencia más popular ya que es económico, confiable. El monómero propileno se polimeriza fácilmente en masa, empleando propileno líquido. Este proceso se puede utilizar para producir todos los tipos de productos de polipropileno con propiedades óptimas. El proceso Spheripol es una tecnología modular, y por lo general consisten en tres unidades principales <sup>[22]</sup>:

1. Alimentación de catalizador
2. Polimerización
3. Sección de acabado

El primer reactor es de tipo bucle (o loop), en el cual se hace circular catalizador y polímero a gran velocidad para que permanezcan en suspensión en el diluyente. El diluyente es en realidad el mismo propileno líquido que, dadas las condiciones de operación, facilita la evacuación del calor generado por la reacción al mismo tiempo que permite aumentar el rendimiento del sistema catalítico. <sup>[24]</sup>

En el segundo reactor de fase gas se incorpora el polímero producido en el reactor loop. En esta fase se preparan grados con características especiales añadiendo un monómero secundario además del monómero principal. Tras separar el polímero fabricado de las corrientes de propileno, y de desactivar el catalizador, el polvo de polipropileno obtenido se envía a la línea de acabado donde se añaden aditivos y se le da la forma de granza requerida para su distribución comercial. <sup>[24]</sup>

El tiempo de residencia es de dos a tres horas a una temperatura de 70°C y una presión de 35 Kg/cm<sup>2</sup>. <sup>[24]</sup>

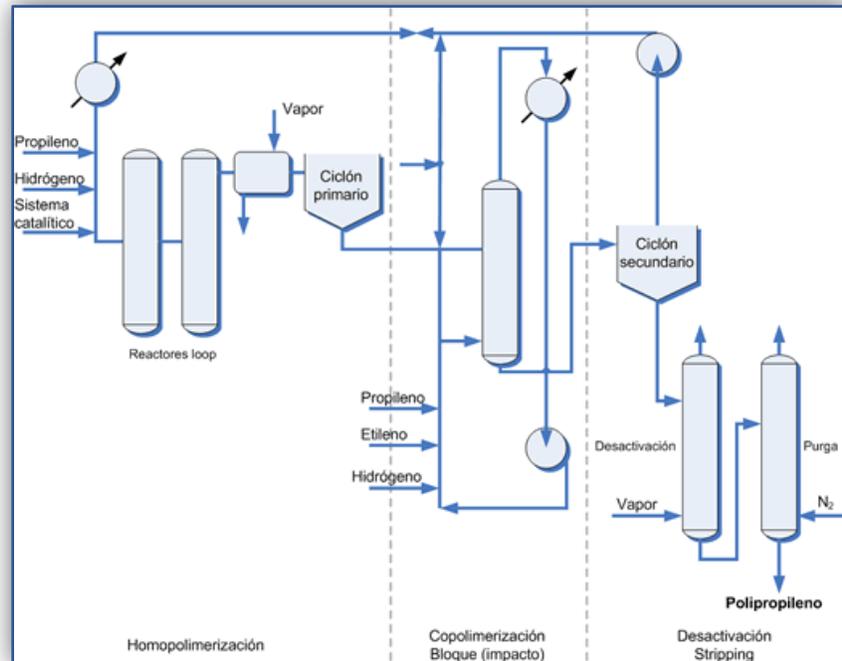


Figura 2.7 Proceso Spheripol.

### 2.2 Polipropileno Espumado (EPP)

El PP ha ganado un gran interés en la aplicación de la espuma, debido a sus excelentes propiedades tanto físicas como químicas, especialmente comparado con el poliestireno y polietileno. <sup>[15]</sup>

El polipropileno espumado (EPP) se utiliza principalmente para la fabricación de fibras, películas, artículos del hogar, recubrimiento de cables, transportación, aparatos domésticos e instrumental médico. También es un material ideal para la fabricación de equipamiento de salvavidas tales como chalecos, boyas, tablas de surf, etc.

Como ventajas tiene bajo peso, resistencia moderada, rigidez, tenacidad a temperaturas elevadas, buena resistencia química y propiedades dieléctricas. Su desventaja principal es que se vuelve frágil por debajo de 0°F (-18°C).

Además de tener buenas propiedades mecánicas tiene una estructura de celda cerrada debido a una conductividad térmica estable, incluso en ambientes húmedos. El EPP puede actuar como un material aislante de calor de alto nivel. En caso de incendio del EPP el gas liberado no es tóxico en comparación con las espumas de poliestireno (PS). También el EPP se puede recuperar y reutilizar, tiene una mejor degradación que la PS y la espuma de polietileno (PE).<sup>[14]</sup>

Se ha demostrado que pequeñas cantidades de nanopartículas dispersas finamente pueden actuar como sitios para la nucleación de burbujas durante el proceso de formación de espuma. Zheng WG *et al.*, investigaron el comportamiento de formación de espuma de PP con una nanopartícula, arcilla. El experimento demostró que la nanopartícula de arcilla tuvo un impacto positivo mejorando la morfología celular, así como la densidad y la expansión del EPP.<sup>[14]</sup>

También Okamoto *et al.*, reportó que las nanopartículas de arcilla ayudan a las células a soportar la fuerza de estiramiento que rompen la pared celular y mejorar el módulo de Young de la espuma.<sup>[15]</sup>

El EPP es ampliamente utilizado en diversos campos, debido a su excelente resistencia, fácil manejo, propiedades mecánicas, razonabilidad económica y protección al medio ambiente.

### 2.2.1 Procesamiento

En general, cualquier proceso de espumado, se centra en la generación de una disolución polímero/gas lo más homogénea posible.

Comúnmente se utilizan cuatro formas para producir el EPP: (1) extrusión, donde la espuma es directamente obtenida en la salida de la boquilla del extrusor; (2) inyección, donde la expansión se ajusta al molde; (3) moldeo por compresión, donde el material se forma aplicando calor y compresión simultáneamente; (4) formación de espuma por lotes, donde el material se espuma disolviendo

inicialmente  $N_2$  o  $CO_2$  en el polímero sólido dentro de los reactores de alta presión y después se expande el material por calentamiento a baja presión por encima de la temperatura de transición vítrea de la mezcla gas-polímero.

### 2.3 Arcillas

Se considera arcilla al grupo de minerales o roca sedimentada, cuya partícula o grano tenga un tamaño inferior a  $2 \mu m$ . Este rango incluye a la mayoría de los filosilicatos e incluso a minerales que no pertenecen a los filosilicatos pero que cumplen con ese tamaño. Las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales. Las arcillas al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos.

#### 2.3.1 Estructura

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos  $(SiO)_4^{4-}$  se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula  $(Si_2O_5)^{2-}$ , que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por  $Al^{3+}$  o  $Fe^{3+}$ . [25]

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos  $Al^{3+}$  o  $Mg^{2+}$ , pueden estar sustituidos por  $Fe^{2+}$  o  $Fe^{3+}$  y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos  $(OH)^-$  de la capa brucítica o gibbsítica, de forma que, en este plano, quede un  $(OH)^-$  en el centro de cada

hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los  $(OH)^-$  son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros. [25]

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan bilaminares, 1:1, o T:O; o bien por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose trilaminares, 2:1 o T:O:T. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina lámina. [25]

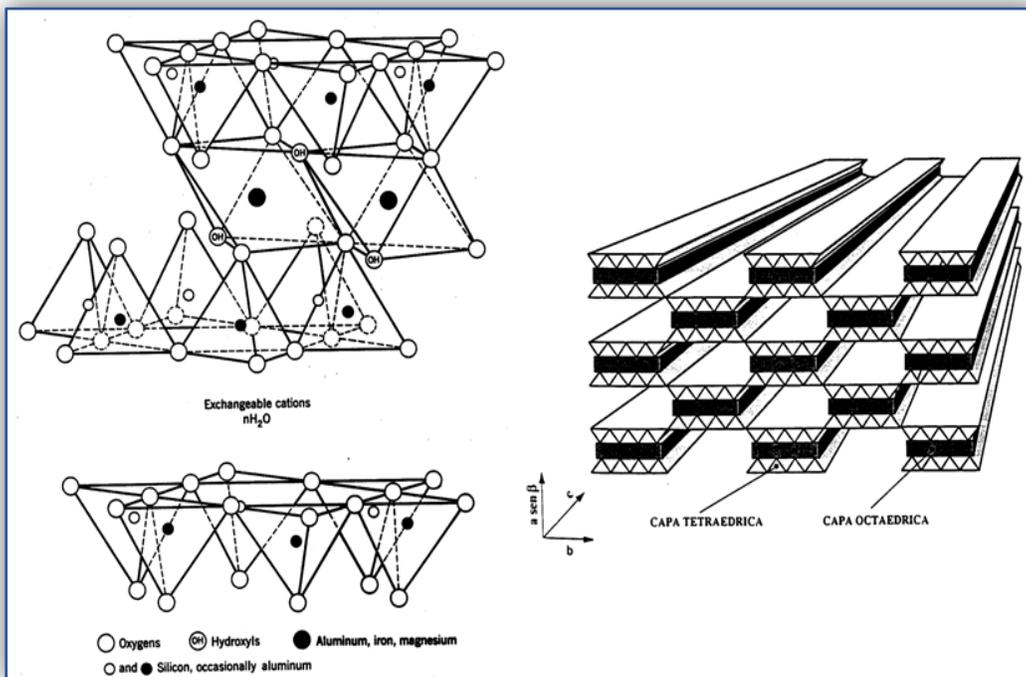


Figura 2.8 Estructura de la arcilla y sus formas laminares.

### 2.3.2 Clasificación

Los filosilicatos se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos. [25]

## CAPITULO II - Generalidades

*Tabla 2.2 Clasificación de las Arcillas.*

|                                     | DIOCTAEDRICOS |                 | TRIOCTAEDRICOS |            | CARGA          |
|-------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|------------|----------------|
| <b>BILAMINARES</b><br>T:O<br>1:1    |               | Caolinita       |                | Antigorita | X=0            |
|                                     | CANDITAS      | Nacrita         | SERPENTINA     | Crisotilo  |                |
|                                     |               | Dickita         |                | Lizardita  |                |
|                                     |               | Halloisita      |                | Bertierina |                |
| <b>TRILAMINARES</b><br>T:O:T<br>2:1 | Pirofillita   |                 | Talco          |            | X=0            |
|                                     |               | Montmorillonita |                | Saponita   | X=0.2-<br>0.6  |
|                                     | ESMECTITAS    | Beidellita      | ESMECTITAS     | Hectorita  |                |
|                                     |               | Nontronita      |                |            |                |
|                                     | Vermiculitas  |                 | Vermiculitas   |            | X= 0.6-<br>0.9 |
|                                     | Illitas       |                 |                |            | X=0.9          |
|                                     |               | Moscovita       |                | Biotita    | X=1            |
|                                     | MICAS         | Paragonita      | MICAS          | Flogopita  |                |
|                                     |               |                 | Lepidolita     |            |                |
| <b>T:O.T:O</b><br>2:1:1             | CLORITAS      |                 |                |            |                |
| <b>FIBROSOS</b>                     | Paligorskita  |                 | Sepiolita      |            |                |

### 2.3.3 Bentonitas

La bentonita es una roca compuesta por más de un tipo de minerales, aunque son las esmectitas sus constituyentes esenciales y las que le confiere sus propiedades características. Es una arcilla igualmente rica en montmorillonita y está formada por silicatos alumínicos hidratados de estructura reticular aplanada. [26]

Existen varios tipos de bentonitas y su denominación depende del elemento dominante. Las principales bentonitas son la cálcica y la sódica. [26]

La bentonita sódica natural tiene alta resistencia al calor y a la sequedad, propiedades necesarias para evitar defectos de expansión de la arena, lavado y erosión del molde, este tipo de bentonita también presenta una alta durabilidad. Además se hinchan al mezclarse con el agua y puede aumentar hasta 12 veces su volumen. <sup>[27]</sup>

La bentonita cálcica es la más abundante en la naturaleza. En su estado natural posee al calcio como catión cambiante. Al agregarle carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) en una cantidad correspondiente a su capacidad de cambio de cationes, puede ser transformada en bentonita sódica. <sup>[27]</sup>

Además de sus propiedades de absorción, la bentonita tiene la interesante propiedad de absorber una gran cantidad de moléculas de proteínas de soluciones acuosas. De esta propiedad se deriva arena sanitaria para gatos y en la producción de alimentos para animales. <sup>[26]</sup>

### 2.3.3.1 Propiedades

Las propiedades de la arcilla bentonita dependen principalmente de: <sup>[28]</sup>

- Tamaño de partícula (inferior a  $2 \mu\text{m}$ )
- Morfología laminar
- Sustituciones isomórficas
  - ✓ Aparición de carga en las láminas.
  - ✓ Presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Las propiedades más características de las bentonitas son: <sup>[28]</sup>

1. La superficie específica, la cual presenta valores elevados de  $150\text{-}800 \text{ m}^2/\text{g}$ .

## CAPITULO II - Generalidades

2. La capacidad de intercambio catiónico, que es la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Las cargas negativas de este mineral se general de 3 formas distintas:
  - Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
  - Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
  - Disociación de los grupos hidroxilo accesibles.
3. La hidratación e hinchamiento que varían en función de la naturaleza del catión interlamina y la carga de la lámina. Las bentonitas sódicas son capaces de aumentar su volumen hasta 15 veces.
4. Alta plasticidad debido a que el agua forma una cubierta sobre las partículas laminares de esmectita produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

En la Tabla 2.3 se hace una comparación de características entre la bentonita sódica y la bentonita cálcica. <sup>[28]</sup>

*Tabla 2.3. Comparación de propiedades.*

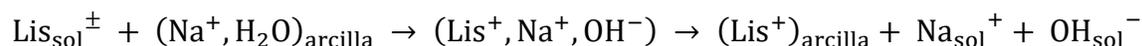
| <b>Propiedad</b>                    | <b>Sódica natural</b> | <b>Cálcica</b> |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------|
| Resistencia a la compresión en seco | Mayor                 | Menor          |
| Permeabilidad                       | Mayor                 | Menor          |
| Durabilidad                         | Mayor                 | Menor          |
| Colapsabilidad                      | Mayor                 | Menor          |
| Plasticidad                         | Menor                 | Mayor          |
| Resistencia al calor                | Menor                 | Mayor          |
| Contracción                         | Mayor                 | Menor          |

### 2.3.3.2 Modificación Química con L-lisina

La arcilla se conforma de tres capas; dos capas tetraédricas con una capa octaédrica de alúmina entre ellas. Las interfaces de la arcilla están cargadas negativamente haciendo capaz la sustitución de Magnesio (II) o Hierro (II) por el Aluminio (II), esta estructura permite tener una alta capacidad de intercambio catiónico y una alta área superficial. Su estructura también presenta grupos aluminol y silanol, en la orilla de las capas, que sirven como protones de adsorción/desorción. Es por esto que la absorción de L-lisina en la arcilla se lleva a cabo por la interacción electrostática entre la carga negativa de la arcilla y la carga positiva de L-lisina. [29]

Se ha encontrado que el incremento de concentración de L-lisina en la solución conlleva a un aumento de adsorción y a mecanismo distinto de interacción. Se tiene que para concentraciones de 0.025 M, la L-lisina se absorbe por transferencia de protones mientras que para concentraciones 0.05-0.4 M el mecanismo principal de adsorción es por interacción L-lisina-L-lisina. [30]

La reacción de intercambio entre la arcilla y la L-lisina se representa de la siguiente manera: [31]



La L-lisina es un aminoácido que contiene dos grupos amino y un carboxilo, se produce por fermentación de un proceso biotecnológico, aunque también se obtiene de fermentación de materia de origen agrícola, como jarabe de caña de azúcar.

En recientes estudios se ha observado por espectroscopia de infrarrojo, que la lisina toma una orientación vertical, con el grupo amino lateral hacia la superficie.

### 2.4 Grafito

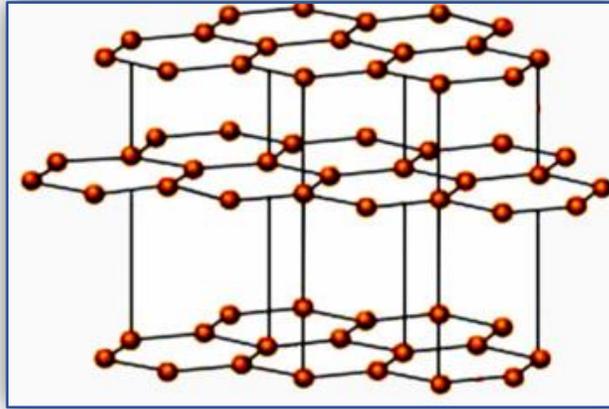
El grafito es el alótropo más estable del carbón en condiciones estándar (1 atmósfera, 25°C) de presión y temperatura, también tiene la característica de ser muy estable a altas temperaturas, además de ser poco reactivo y aislante térmico, estas propiedades hacen que sea utilizado en la fabricación de ladrillo, crisoles y moldes resistentes al calor (empleados incluso para manejar metales fundidos).<sup>[32]</sup>

Es un mineral suave, de color gris a negro, brillo metaloide, estable y químicamente inerte a temperatura normal, inodoro, no tóxico, resistente al calor y excelente conductor de calor y electricidad.

Las aplicaciones de un material como el grafito son muy amplias, ya que posee unas excelentes propiedades, bien sea como lubricante o como conductor eléctrico y térmico. Además, recientes investigaciones le sitúan como un material precursor para la fabricación de otros, como pueden ser los nanotubos de carbono (NTC).<sup>[32]</sup>

#### 2.4.1 Estructura

Su estructura está formada por muchas láminas de grafeno superpuestas una a continuación de otra. El grafito es un material que está compuesto por láminas de átomos de carbono, como se muestra en la Figura 2.9, en cuyo interior, dichos átomos se mantienen unidos por enlaces covalentes formando anillos de seis átomos de carbono.



*Figura 2.9 Estructura del grafito.*

En los productos resultantes donde se utiliza el grafito, se conserva la estructura cristalina del mismo, ya que los átomos o iones que se introducen en ella, se acomodan dentro de las capas en una relación estequiométrica. De este modo, los productos de reacción pueden ser descritos como compuestos de intercalación, debido a la inserción en las capas de átomos distintos a los que forman la estructura base. <sup>[32]</sup>

### 2.5 Nanotubos de Carbono

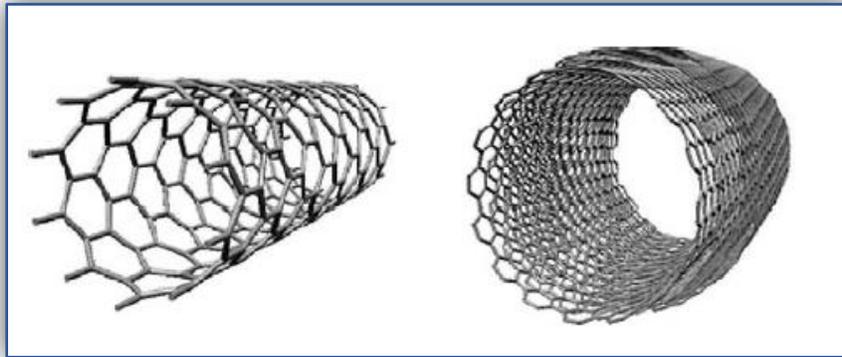
Los nanotubos de carbono consisten en fullerenos tubulares a partir de hojas de grafeno dobladas en forma cilíndrica. <sup>[33]</sup>

Los nanotubos de carbono fueron descubiertos en 1991 por Lijima y aun siguen siendo estudiados extensivamente ya que estos proporcionan excepcionales propiedades a los materiales. Datos de la literatura indican que los nanotubos de carbono tienen un alto módulo de Young, tiene puntos fuertes de hasta 200 GPa. Además de las propiedades mecánicas excepcionales, también tienen propiedades térmicas y eléctricas superiores.

Los nanotubos de carbono tienen una estructura en forma de jaula formada por anillos hexagonales y pentagonales de átomos de carbono. Estos también pueden ser semiconductores dependiendo de su estructura molecular exacta y así se pueden emplear como un aditivo para hacer polímeros conductores. <sup>[33]</sup>

### 2.5.1 Estructura

Los nanotubos de carbono tienen formas tubulares de carbono, se conocen dos estructuras, en primer lugar de pared múltiple (MWCNT's) y de una sola pared (SWNT's), estas estructuras se muestra en la Figura 2.10. Los nanotubos de carbono de una sola pared pueden ser considerados una sola hoja de grafeno enrolladas a la perfección en un cilindro. Son esencialmente polímeros de escalera formada únicamente por átomos de carbono que no tienen grupos laterales. <sup>[33]</sup>



*Figura 2.10 Representación esquemática de Nanotubos de carbono de pared simple (izquierda) y múltiple pared (derecha).*

### 2.5.2 Propiedades

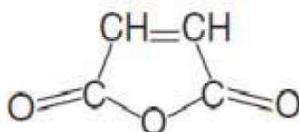
Los nanotubos de carbono aumentan muchas propiedades mecánicas del PP por ejemplo el módulo de Young aumenta hasta un 50 %.

La fuerza y dureza de los nanotubos es extraordinariamente alta, la fuerza de flexión para MWCNT's en promedio es de  $14.2 \pm 0.8$  GPa, esto es 14 veces mayor que la asociada con una fibra de grafito. <sup>[33]</sup>

### 2.6 Anhídrido Maléico (MAH)

Fórmula Molecular:  $C_4H_2O_3$

Estructura molecular:



En su forma pura, el anhídrido Maleico es un sólido cristalino incoloro o blanco de olor acre, irritante y muy corrosivo. En disolución acuosa es un ácido fuerte que reacciona de forma violenta con bases y oxidantes fuertes. <sup>[34]</sup>

Se comercializa en forma de sólidos cristalinos con una pureza de 99.5 %.

#### 2.6.1 Propiedades

Este material se considera estable. Sin embargo, debe dejarse alejado de la humedad, el calor o la llama. Esto se debe a que reacciona con agua para formar el ácido Maléico. <sup>[34]</sup>

Su mayor aplicación es la producción de resinas por medio de la reacción de esterificación. Comercialmente los productos más relevantes obtenidos a partir del anhídrido maléico son las resinas insaturadas y alquídicas, en aplicaciones tales como lacas, plastificantes, copolímeros y lubricantes.

Para mejorar las interacciones interfaciales entre el polipropileno y otros componentes, como lo son las arcillas, se deben hacer modificaciones en la estructura química del polipropileno por lo que se injerta anhídrido maléico (AM) en las cadenas de polipropileno, para optimizar las propiedades físicas. Algunas de las propiedades físicas del anhídrido maléico se pueden ver en la Tabla 2.4.

*Tabla 2.4 Propiedades físicas del Anhídrido Maléico.*

| <b>Propiedad</b>                    | <b>Valor</b> |
|-------------------------------------|--------------|
| Peso Molecular (g/mol)              | 98.1         |
| Punto de ebullición (°C) (760 mmHg) | 202          |
| Punto de fusión (°C)                | 52.8         |
| Estado físico                       | Sólido       |

### 2.6.2 Injerto de Anhídrido Maleico en Polipropileno

La literatura menciona que en las reacciones de injerto que se llevan a cabo por extrusión, se hace reaccionar el polímero fundido con un monómero, mezcla de monómeros y un compuesto químico (ácido, anhídrido, peróxido), con la finalidad de formar injertos de grupos funcionales en la cadena polimérica. Los iniciadores más comunes que se utilizan en las reacciones de injerto son los indicadores de radicales libres.<sup>[35]</sup>

De acuerdo a diferentes estudios realizados se ha encontrado que el proceso de injertar la molécula de anhídrido maléico al polipropileno da origen a diferentes mecanismos de reacción. Shi et al.<sup>[36]</sup>, estudiaron el mecanismo de injerto del PP con MAH preparado por extrusión reactiva. Obteniendo diferentes estructuras (Figura 2.11).

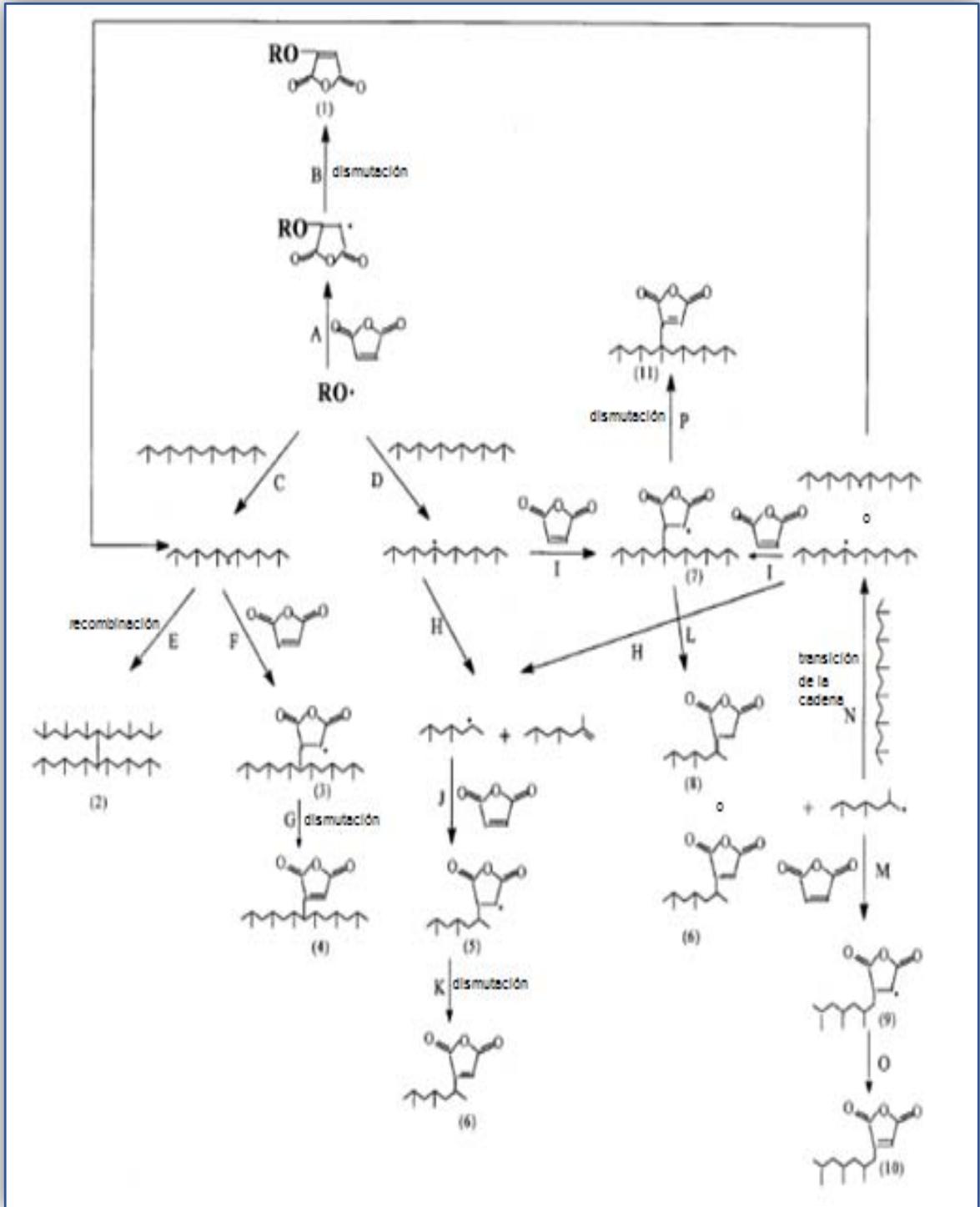


Figura 2.11 Mecanismo de injerto de MAH sobre PP por extrusión reactiva.

En la Figura 2.11 se muestra que la reacción A sucede cuando se excede la concentración de MAH. Durante la reacción de iniciación, el peróxido de benzoilo forma radicales benzoiloxi (RO), a partir de esto se genera un radical libre en un carbono secundario o terciario de la cadena PP, esto se muestra en las reacciones C y D, En las reacciones F e I se injerta el MAH. Los radicales libres en el MAH injertado pueden terminar como se muestra en las reacciones G, K, O y P. La formación de radicales libres en las cadenas de PP pueden dar origen a un entrecruzamiento (reacción E), lo cual haría difícil el injerto de MAH. La reacción D es resultado de la formación de radicales libres terciarios donde puede dar lugar a un rompimiento  $\beta$  (reacción H) donde se observa el doble enlace y el radical libre de cadenas distintas de PP, Donde el radical puede reaccionar con MAH y dar lugar al injerto.

### 2.7 Procesamiento de Polímeros

#### 2.7.1 Extrusión

El proceso de extrusión se utiliza ampliamente en la industria de plásticos para la producción en continuo de piezas con sección constante de materiales termoplásticos (y algunos termoestables). Debido a que estos plásticos se suavizan cuando se calientan y se transforman en fluidos, que posteriormente se endurecen cuando se enfrían. Se usa también para recubrimiento de superficies y en el moldeo por soplado. Consiste en obligar a un material fundido a pasar a través de una boquilla o matriz con la forma adecuada para obtener el diseño deseado. <sup>[37]</sup>

Un extrusor se conforma de un husillo o tornillo que gira dentro de un barril o cilindro, y es capaz de bombear un material a una velocidad específica, bajo ciertas condiciones de operación. <sup>[37]</sup>

Cuando un material termoplástico se alimenta al extrusor, el husillo lo empuja hacia delante a lo largo del barril, donde se calienta y se transforma en fluido. Este fluido continúa y al final se le hace pasar a través de un dado que proporciona el perfil o la forma final deseada. Una vez que sale del dado, el fluido debe ser enfriado rápidamente para mantener la forma que se obtiene del dado. [37]

La sección del husillo y barril tiene la función de presurizar, calentar, mezclar y bombear. Se divide en tres secciones: la alimentación, compresión y dosificación. La función de la zona de alimentación es coleccionar los gránulos de la tolva y transportarlos hacia adelante al canal del husillo. Al mismo tiempo, los gránulos empiezan a calentarse y a comprimirse a medida que avanzan a través del canal. [37]

### *2.7.1.2 Extrusor mono-husillo*

En este tipo de extrusor la rotación del husillo no es capaz de transportar el material hacia delante por sí solo. De hecho, si el material que se encuentra en el interior del barril se adhiere al husillo, este material daría vueltas junto con el husillo, si moverse hacia adelante. [37]

La única fuerza que puede evitar que el material de vueltas junto con el husillo es la fuerza de arrastre o fricción entre el material y la superficie interna del barril. A mayor fricción, menor rotación del material con el husillo y por lo tanto más movimiento hacia adelante. Para aumentar la superficie de fricción y tener más propulsión del polímero se incrementa la longitud del barril. [37]

El tornillo de un extrusor tiene uno o dos “hilos en espiral a lo largo de su eje. El diámetro medido hasta la parte externa del hilo es el mismo en toda la longitud para permitir un ajuste preciso en una camisa cilíndrica, con un espacio apenas suficiente para dejarlo rotar. [37]

### 2.7.1.3 Extrusor Doble Husillo

Una manera de categorizar los extrusores que tienen dos husillos es de acuerdo a la geometría de los husillos, las hélices y los canales. La principal categoría es: <sup>[37]</sup>

- Husillos que no engranan
- Husillos que engranan
  - ✓ Husillos no conjugados
  - ✓ Husillos conjugados
  - ✓ Husillos corrotatorios, que giran en la misma dirección
  - ✓ Husillos contrarrotatorios, que giran en diferente dirección

Las velocidades de giro de las extrusoras de doble usillo son normalmente mucho más pequeñas que las de las maquinas de un solo tornillo. <sup>[37]</sup>

Aunque un extrusor monohusillo puede producir un compuesto; es más eficiente y eficaz un extrusor doble usillo, pues tiene la capacidad de incorporar mejor los aditivos. <sup>[37]</sup>

## 2.8 Caracterización de Polímeros

### 2.8.1 Pruebas Mecánicas

El conocimiento de las propiedades mecánicas de un material nos proporciona un criterio para determinar la capacidad de soportar esfuerzos y deformación. El comportamiento mecánico de un material depende de su naturaleza, estructura, composición, modo de transformación, forma de la probeta, condiciones operatorias del ensayo, etc.

### 2.8.1.1 Deformación Elástica de los Polímeros

Los materiales poliméricos presentan tres tipos distintos de comportamiento esfuerzo-deformación (Figura 2.11) La curva A corresponde al comportamiento esfuerzo-deformación de un polímero frágil, ya que se rompe cuando se deforma elásticamente. El comportamiento del material representado por la curva B, después de la deformación elástica inicial el material fluye y luego se deforma plásticamente. Finalmente, el comportamiento descrito por la curva C es totalmente elástico. <sup>[38]</sup>

El módulo de Young, E, se puede determinar a partir de la pendiente inicial de cada una de estas curvas. Uno de los aspectos más útiles de los polímeros es la amplia gama de módulos que se pueden obtener. Los elastómeros tienden a tener módulos del orden de  $10^6$  Pa. Los polímeros semi-cristalinos se pueden considerar como un compuesto que consiste en cristales de polímero distribuidas en la matriz amorfa y tiene un módulo de Young del orden de  $10^8$  a  $10^9$  Pa. Los módulos de los polímeros cristalinos son típicamente del orden de  $10^9$  Pa. <sup>[38]</sup>

Los valores elevados del módulo de Young indican que el material es rígido, resistente al alargamiento y estirado.

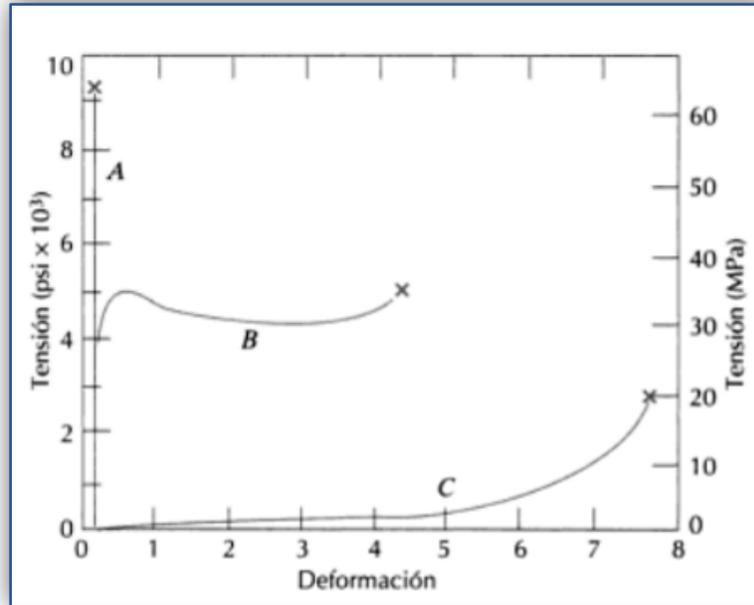


Figura 2.12 Comportamiento Esfuerzo-Deformación de los polímeros: frágil (curva A), plástico (curva B) y elevada elasticidad (elastómero) (curva C).

### 2.8.1.2 Flexión

La resistencia a la flexión, también conocida como módulo de rotura, representa el máximo esfuerzo desarrollado en la superficie de la probeta en forma de barra.

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia al doblado o la rigidez de ensayo utilizada como viga simple según la norma ASTM-D790-02. La muestra se coloca apoyada en dos soportes, como se ve en la Figura 2.12. Se aplica una carga en el centro de la probeta en un tiempo determinado y la carga de rotura se denomina resistencia a la flexión. <sup>[39]</sup>

La resistencia se define como la capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo.

## CAPITULO II - Generalidades

Los ensayos de flexión se utilizan principalmente como medida de la rigidez de un material. La resistencia de un objeto a doblarse o su capacidad de doblarse sin romperse depende no solo de la composición sino también de la forma del objeto. <sup>[39]</sup>

En los ensayos de flexión, en la parte superior de la muestra está sometida a compresión mientras que en la parte inferior está sometida a tracción. La superficie neutra no experimenta cambio de longitud, ello significa que la fuerza de la barra depende de las propiedades elásticas del material del que está formada. Las superficies superior e inferior de la barra son las que más se distorsionan, de modo que las mayores fuerzas internas aparecerán en estas superficies.

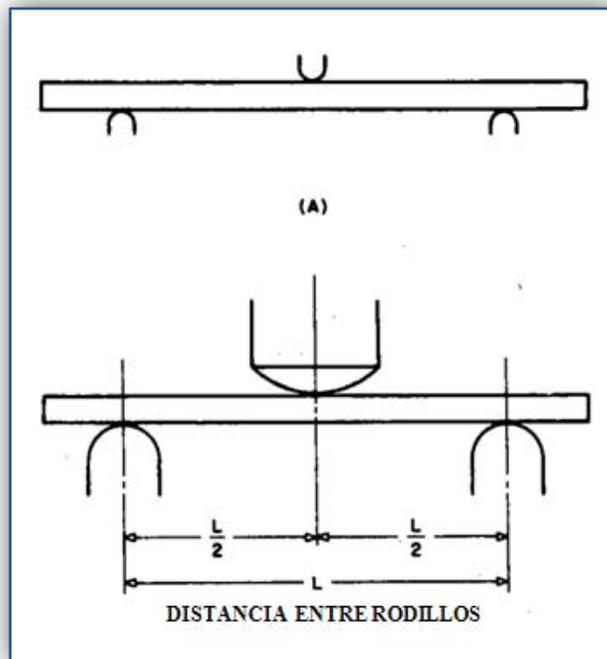


Figura 2.13 Esquema de ensayo de flexión en tres puntos, de acuerdo a la norma ASTM D790-02.

### 2.8.1.3 Dureza

La dureza es una característica por la que un material se opone a ser rayado o a ser penetrado. Se suele medir por el valor de esfuerzo aplicado a una bola o a un punzón, para imprimir una deformación dada en la superficie del material. <sup>[40]</sup>

En el caso de los plásticos la medida de la dureza deriva de los métodos aplicados a los metales (Rockwell) o a los cauchos (Shore). Existen varias escalas que abarcan los distintos intervalos de dureza. <sup>[40]</sup>

Hay dos tipos de durómetros Shore, al A y el D. En el tipo A se utiliza un penetrador con forma de varilla roma para probar los plásticos blandos. En el tipo D se emplea un penetrador con varilla puntiaguda para medir los materiales más duros. Se aplica una fuerza de 12,5 N en Shore A y de 50 N en shore D. Las lecturas son rápidas y sencillas se apoya el aparato sobre el material, se hace presión manual (entre 1 y 10 segundos) y se toma el valor Las escalas van de 0 a 100.

### 2.8.1.4 Tenacidad

La tenacidad es una medida de energía que una muestra puede absorber antes de que se rompa. También se puede definir como la resistencia a la rotura de un material cuando está sometido a esfuerzos lentos de deformación. La Tenacidad se mide mediante la grafica de esfuerzo-deformación, se representa como el área bajo la curva.

### 2.8.2 Análisis Térmicos

La estabilidad térmica de los polímeros define la temperatura hasta que son capaces de mantener sus propiedades mecánicas y sin degradarse. <sup>[40]</sup>

Los análisis térmicos son aquellos que miden algún efecto de la temperatura sobre el material.

### 2.8.2.1 Termogravimetría (TGA)

Es una técnica mediante la cual una muestra se pesa continuamente a medida que se calienta a una velocidad controlada. La variación de peso frente a la temperatura da lugar a una curva, denominada termograma, que proporciona información acerca de la estabilidad térmica y composición de la muestra original, la composición y la estabilidad de los compuestos intermedios y la composición del residuo. Cada material tiene su termograma correspondiente, lo cual permite su identificación. <sup>[40]</sup>

Mediante la termogravimetría se puede medir el cambio de masa de una muestra cuando esta se expone a una variación de temperatura dentro de una atmosfera controlada. El análisis por TGA puede proporcionar información valiosa respecto a diferentes procesos físicos o químicos sucedidos en la muestra, como son: transición de fase, adsorción, absorción, descomposición, entre otros. <sup>[40]</sup>

### 2.8.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Un microscopio SEM es un equipo de visualización de alta resolución que permite al análisis superficial de una muestra al escanearla con un haz de electrones enfocado. De manera análoga a un microscopio óptico (donde una imagen se forma como resultado de la dispersión de la luz), un microscopio SEM se basa en el monitoreo de los electrones secundarios emitidos desde la muestra como consecuencia de su interacción con el haz principal.

Un microscopio SEM proporciona aumentos desde 25X hasta 1 000 000X con 1µm de resolución, lo cual permite observar la morfología de nanoestructuras.

## **CAPITULO II - Generalidades**

---

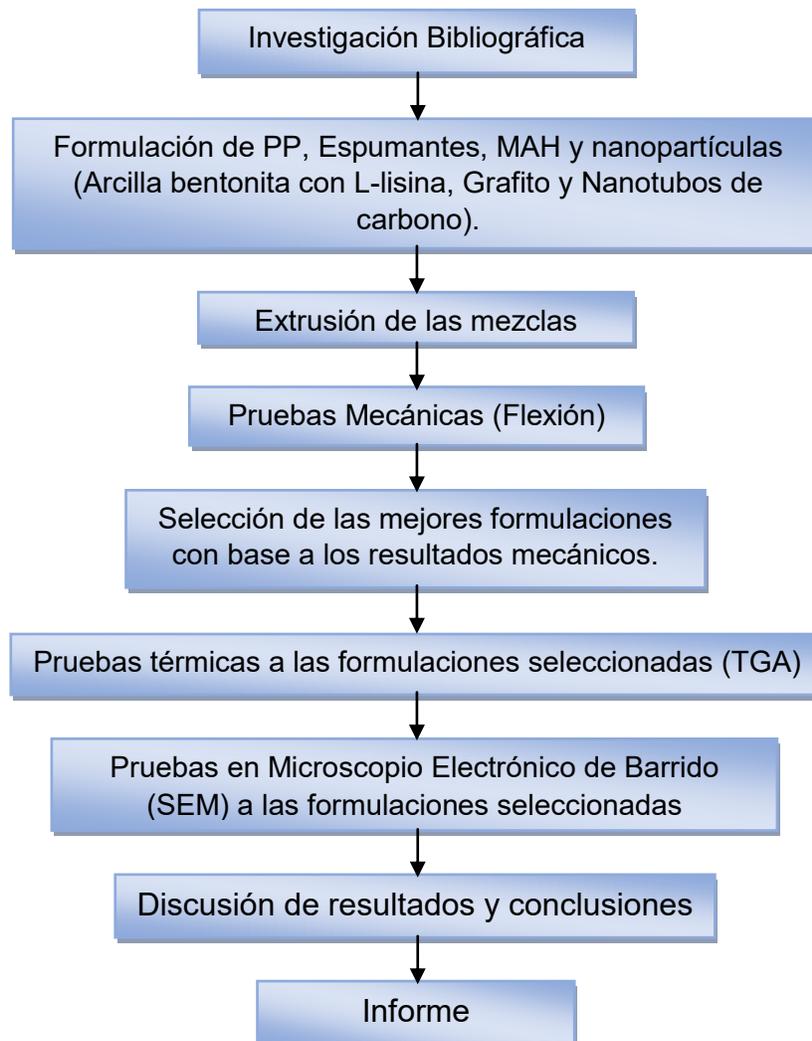
El funcionamiento se basa en el barrido de la superficie de un espécimen, usando un haz de electrones los cuales interactúan con la muestra generando varios tipos de señales (electrones secundarios), que son colectados por un detector específico para cada una de ellas y que producen un determinado tipo de información (por ejemplo, los electrones secundarios dan información de relieve superficial del espécimen).

En general cualquier material sólido libre de agua y aceite puede ser observado en SEM, el requisito fundamental es que la muestra sea conductora para evitar una carga por efecto del haz de electrones primarios. En caso de que la muestra no sea un conductor esta debe ser recubierta por una capa delgada de material conductor con un grosor de pocos nanómetros, está cubierta puede ser de grafito, plata, oro, platino, etc. El recubrimiento se lleva a cabo en un evaporador al vacío.

### Desarrollo Experimental

#### 3.1 Metodología

En este capítulo se menciona el equipo utilizado para la experimentación así como una breve descripción del procesamiento y caracterización del producto obtenido. A continuación se muestra un diagrama con la metodología experimental que se siguió.



## CAPITULO III – Desarrollo Experimental

### 3.2 Equipo

- I. Extrusor TW-100 Haake Rheocord 90 con doble husillo cónico rotatorio, con longitud de usillo de 331 mm, diámetro inicial de 31.1 mm y diámetro final de 19.7 mm, barril de diámetro inicial de 31.7 mm, diámetro final de 20 mm y diámetro exterior de 34.9 mm.
- II. Máquina de pruebas universales INSTRON, modelo 1125
- III. Equipo de análisis termogravimétrico, TA Instruments.
- IV. Equipo de microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FE SEM) modelo JSM-7600F marca JEOL
- V. Durómetro Shora A
- VI. Molde (Ver Figura 3.1).

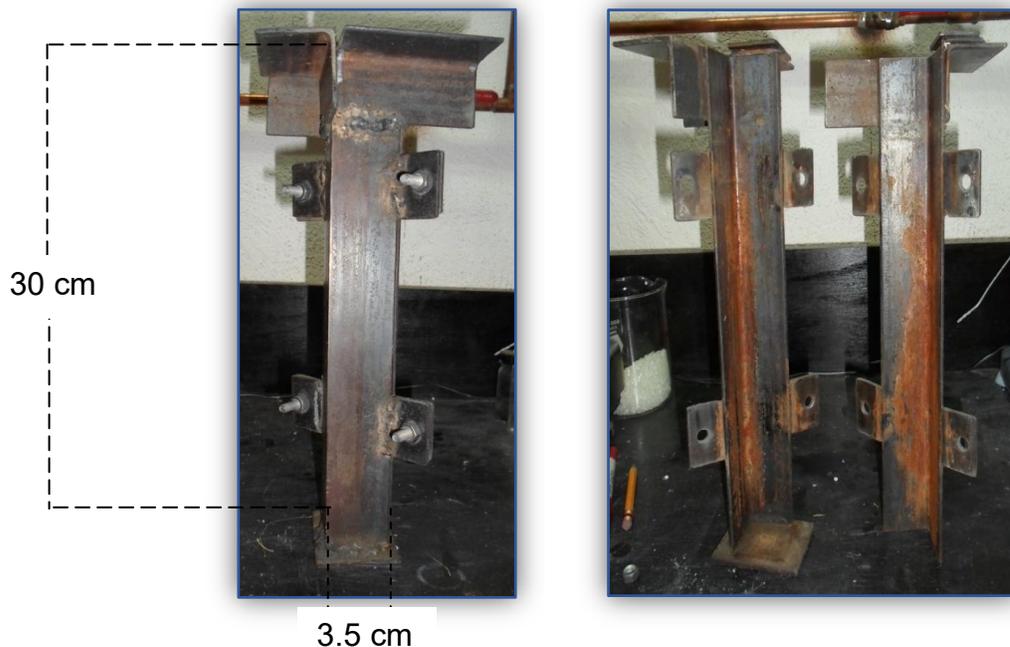


Figura 3.1 Características del molde utilizado.

### 3.2 Materias Primas

- I. Polipropileno Formolene 2306Ncopolimero de alto impacto, distribuido por la compañía Polímeros Nacionales, S.A de C.V.

Densidad: 0.9 g/cm<sup>3</sup>

Resistencia a la tensión: 4350 psi

Módulo de flexión: 200 000 psi

Índice de fluidez 6 g/10 min

- II. Espumante SAFOAM FPE-20 distribuido por la compañía Reedy Chemical Foam & Specialty Additives

SAFOAM FPE -20 es un concentrado de pellets endotérmico (absorción de calor) de nucleación química y agente espumante para la creación de una estructura espumada en los termoplásticos. Es comúnmente usado en el moldeo por inyección para reducir la energía de la máquina, quitar marcas de hundimiento, limitar la deformación, mejorar el tiempo de ciclo y para la reducción de peso. En operaciones de extrusión que se utiliza para la creación de células muy finas para reducir la densidad y mejorar el rendimiento en producto extruido de densidad media.

Total de desprendimiento de gas: 50 ± 10 ml / gramo

Apariencia: pellets de blanco

Densidad aparente: 0,60 ± 0,10 gramos / cc

Temperatura de descomposición: 161°C (322°F)

Recomendaciones generales de dosificación: 0,5 % - 2,0 %

## CAPITULO III – Desarrollo Experimental

---

- III. Espumante SAFOAM FPE-50 distribuido por la compañía Reedy Chemical Foam & Specialty Additives

SAFOAM FPE -50 es un concentrado de pellets endotérmico (absorción de calor) de nucleación química y agente espumante para la creación de una estructura espumada en los termoplásticos. Es comúnmente usado en el moldeo por inyección para reducir la energía de la máquina, quitar marcas de hundimiento, limitar la deformación, mejorar el tiempo de ciclo y para la reducción de peso. En operaciones de extrusión que se utiliza para la creación de células muy finas para reducir la densidad y mejorar el rendimiento en producto extruido de densidad media.

Total de desprendimiento de gas:  $100 \pm 10$  ml / gramo

Apariencia: pellets de blanco

Densidad aparente:  $0,60 \pm 0,10$  gramos / cc

Temperatura de descomposición:  $158^{\circ}\text{C}$  ( $316^{\circ}\text{F}$ )

Recomendaciones generales de dosificación: 0,5 % - 2,0 %

- IV. Anhídrido maléico (MAH) 95% de pureza de la compañía Aldrich.
- V. Arcilla modificada químicamente con L-lisina distribuido por la compañía Nanoplasticos, S.A. de C.V.
- VI. Nanotubos de Carbono distribuido por la compañía Nanocyl S.A

Densidad:  $1.33-1.4$  g/cm<sup>3</sup>

Fuerza de tensión:  $45 \times 10^{12}$  Pa

Resistencia: Pueden ser doblados en ángulos grandes y volver a su estado normal sin sufrir daño

Estabilidad a la temperatura:  $750^{\circ}\text{C}$

Dureza: 70

## CAPITULO III – Desarrollo Experimental

Modulo de Young: 270 GPa

### VII. Grafito AP Malla 325 (44 micras)

Densidad: 2.1-2.2 g/cm<sup>3</sup>

Resistencia: 25-52 MPa

Dureza: 1-2 (Mohs), es muy blando.

Modulo de Young: 27 GPa

Es una forma alotrópica y cristalina del carbón, con brillo metálico, de color gris a negro, relativamente blando. Es estable, inerte químicamente a temperatura normal, inodoro, no toxico y excelente conductor de calor y electricidad. Bajos coeficientes de fricción y expansión térmica. Su presentación es de polvo fino.

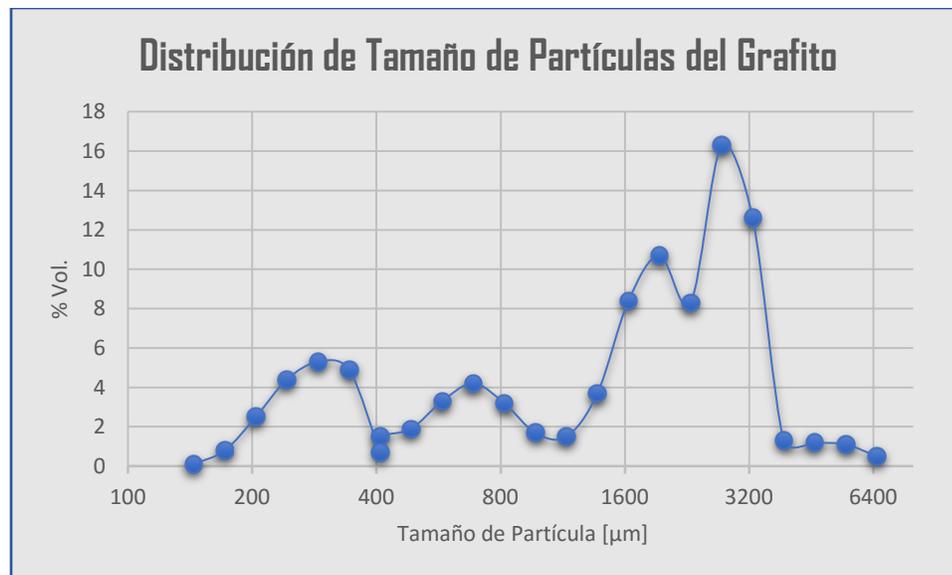


Figura 3.2 Distribución de tamaño de partícula del grafito.

La distribución del tamaño de partícula del grafito fue determinada en un equipo de Ligth Scattering Microtac.

## CAPITULO III – Desarrollo Experimental

### 3.4 Condiciones de Procesamiento

Las condiciones de operación se determinaron con únicamente PP al inicio de la experimentación.

#### Extrusión

Perfil de temperaturas:

- Zona 1: 180 °C
- Zona 2: 190 °C
- Zona 3: 200 °C
- Zona 4: 210 °C

Velocidad del motor: 50 RPM

Velocidad del dosificador: 50 RPM

En la Figura 3.3 se muestra la extrusión que se realizó con las 3 diferentes cargas que se utilizaron en la formulación de los nanocompuestos.



*Figura 3.3 Extrusión de PP espumado con A-L-lisina, Grafito y NTC (de izquierda a derecha).*

## CAPITULO III – Desarrollo Experimental

### 3.5 Procedimiento para la Formulación de Nanocompuestos

1. Se prepararon muestras de PP con cada uno de los espumantes a diferentes concentraciones, desde 0.5 phr hasta 5 phr. Se utilizó una base de PP de 243 g. (Tabla 3.1)

Tabla 3.1 Muestras de PP con espumante.

| Mezcla | phr Espumante Safoam FPE-20 | Mezcla | phr Espumante Safoam FPE-50 |
|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|
| 1      | 0.5                         | 7      | 0.5                         |
| 2      | 1                           | 8      | 1                           |
| 3      | 2                           | 9      | 2                           |
| 4      | 3                           | 10     | 3                           |
| 5      | 4                           | 11     | 4                           |
| 6      | 5                           | 12     | 5                           |

2. Se realizaron las siguientes muestras con la formulación anterior pero ahora añadiendo 2 phr las nanopartículas (arcilla bentonita con L-lisina, grafito y nanotubos de carbono). Como se muestra en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Muestras de PP con Espumante y Nanopartículas (carga).

| Mezcla              | phr de Espumante Safoam FPE-20 | Mezcla | phr de Espumante Safoam FPE-20 |
|---------------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|
| 2 phr de A-L-lisina |                                |        |                                |
| 13                  | 0.5                            | 31     | 0.5                            |
| 14                  | 1                              | 32     | 1                              |
| 15                  | 2                              | 33     | 2                              |
| 16                  | 3                              | 34     | 3                              |
| 17                  | 4                              | 35     | 4                              |
| 18                  | 5                              | 36     | 5                              |

## CAPITULO III – Desarrollo Experimental

| 2 phr de grafito |     |    |     |
|------------------|-----|----|-----|
| 19               | 0.5 | 37 | 0.5 |
| 20               | 1   | 38 | 1   |
| 21               | 2   | 39 | 2   |
| 22               | 3   | 40 | 3   |
| 23               | 4   | 41 | 4   |
| 24               | 5   | 42 | 5   |
| 2 phr de NTC     |     |    |     |
| 25               | 0.5 | 43 | 0.5 |
| 26               | 1   | 44 | 1   |
| 27               | 2   | 45 | 2   |
| 28               | 3   | 46 | 3   |
| 29               | 4   | 47 | 4   |
| 30               | 5   | 48 | 5   |

3. Por último se realizaron nuevamente las formulaciones descritas en el numero 2, pero ahora añadiendo 2 phr del compatibilizante MAH (Tabla 3.3).

*Tabla 3.3 Muestras de PP con Espumante, Nanopartículas (carga) y MAH.*

| Mezcla                         | phr de Espumante Safoam FPE-20 | Mezcla | phr de Espumante Safoam FPE-20 |
|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|
| 2 phr de A-L-lisina + 2phr MAH |                                |        |                                |
| 49                             | 0.5                            | 67     | 0.5                            |
| 50                             | 1                              | 68     | 1                              |
| 51                             | 2                              | 69     | 2                              |
| 52                             | 3                              | 70     | 3                              |
| 53                             | 4                              | 71     | 4                              |
| 54                             | 5                              | 72     | 5                              |
| 2 phr de G + 2phr MAH          |                                |        |                                |
| 55                             | 0.5                            | 73     | 0.5                            |
| 56                             | 1                              | 74     | 1                              |
| 57                             | 2                              | 75     | 2                              |

## CAPITULO III – Desarrollo Experimental

|                         |     |    |     |
|-------------------------|-----|----|-----|
| 58                      | 3   | 76 | 3   |
| 59                      | 4   | 77 | 4   |
| 60                      | 5   | 78 | 5   |
| 2 phr de NTC + 2phr MAH |     |    |     |
| 61                      | 0.5 | 79 | 0.5 |
| 62                      | 1   | 80 | 1   |
| 63                      | 2   | 81 | 2   |
| 64                      | 3   | 82 | 3   |
| 65                      | 4   | 83 | 4   |
| 66                      | 5   | 84 | 5   |

Posteriormente se realizaron pruebas mecánicas a todas las formulaciones realizadas, en la Figura 3.3 se muestran las pruebas de flexión en tres puntos.



Figura 3.4 Pruebas de Flexión al PP espumado con A-L-lisina, Grafito y NTC (de izquierda a derecha).

### Capítulo IV

## Resultados y Discusión

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos de la caracterización térmica, mecánica y de microscopia electrónica de barrido de las diferentes muestras procesadas durante la experimentación.

### 4.1 Propiedades Mecánicas

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas del polipropileno con los dos diferentes aditivos espumantes, FPE-20 y FPE-50, a diferentes concentraciones y con arcilla modificada con L-lisina, grafito y nanotubos de carbono.

Se indica mediante porcentajes el incremento de cada una de las propiedades y con cada una de las cargas, así como con cada uno de los aditivos espumantes

De la Figura 4.1 a la Figura 4.10 representan las gráficas en donde se puede observar que las mezclas que presentan mejores propiedades mecánicas son las que contiene A L-lisina en ambos espumantes con una concentración de 2 y 4 phr de los aditivos espumantes y con 5 phr únicamente del espumante FPE-50. Con estas mismas concentraciones de aditivos se observa un incremento en general en todas las propiedades mecánicas con las cargas de grafito y nanotubos de carbono, aunque son inferiores a las que contienen A-L-lisina.

Las Figuras 4.1 y 4.2 representan las gráficas en las cuales se observa que las formulaciones con A-L-lisina tienen una mejor resistencia a la flexión, esta propiedad indica el máximo esfuerzo al doblado o la rigidez en la superficie de la

## CAPITULO IV – Resultados y Discusión

---

probeta en forma de barra. Se observa un aumento del 47.2 % de resistencia a la flexión en las formulaciones con A-L-lisina, aumentó esta propiedad un 8.1 % con grafito y un 23.9 % con NTC, sólo con el espumante FPE-20.

Con respecto al espumante FPE-50 se obtuvo un incremento de la resistencia a la flexión del 45.3 %, 20.5 % y 23.4 % con A-L-lisina, grafito y NTC respectivamente.

En las Figuras 4.3 y 4.4 se observan las gráficas que representan el módulo de flexión, la primera grafica con el aditivo espumante FPE-20 y la segunda con el espumante FPE-50. Aquí se observa que las formulaciones con las 3 cargas tienen resultados similares, ya que con el espumante FPE-20 se incrementó un 48.9 % con A-L-lisina, 37.9 % con grafito y 36.3 % con NTC.

Con el espumante FPE-50 se incrementó el modulo de flexión un 34.2 % con A-L-lisina, 31.2 % con G y 37.6 % con NTC. Esta propiedad indica que el material es rígido, resistente al alargamiento y estirado así como a la flexión.

Las Figuras 4.5 y 4.6 representan las gráficas en donde se observan los resultados respecto a la tenacidad, esta propiedad indica la energía que una muestra puede absorber antes de que se rompa. En estas gráficas se puede observar que los compuestos que tiene una mayor tenacidad son los que contiene A-L-lisina en ambos aditivos espumantes, ya que con el espumante FPE-20 se aumentó hasta un 50.1 % la tenacidad con A-L-lisina, 7.2 % con grafito y 16.2 % con NTC, respecto al espumante FPE-50 se aumentó la tenacidad un 49.5 %, 16.5 % y 13.4 % con A-L-lisina, G y NTC respectivamente.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se muestran las gráficas con los resultados obtenidos respecto a la dureza del material, nuevamente las formulaciones realizadas con arcilla L-lisina son las que presentan una mayor dureza ya que aumentó un 3.1 % esta propiedad, seguidas por las formulaciones que contienen grafito con un aumento del 0.66 % y finalmente se aumentó un 0.26 % con NTC, esto con el espumante FPE-20.

## CAPITULO IV – Resultados y Discusión

---

Con respecto al espumante FPE-50 únicamente se obtuvo un incremento de la dureza del nanocompuesto del 1.31 % en las formulaciones de A-L-lisina, ya que con el G y NTC se obtuvo un incremento en la dureza solamente del 0.5 % y 0.2 % respectivamente.

Finalmente en las Figuras 4.9 y 4.10 se observan las gráficas que representan los resultados obtenidos referentes a la densidad del material, en donde las formulaciones hechas con grafito y nanotubos de carbono son las más ligeras al obtener densidades entre 0.85 y 0.55 g/cm<sup>3</sup> y en formulaciones hechas con arcilla L-lisina se obtuvieron densidades entre 0.90 y 0.70 g/cm<sup>3</sup>, estos resultados fueron para ambos aditivos espumantes.

En comparación el PP con el espumante FPE-20 aumentó la densidad un 1.6 % con A-L-lisina, 0.8 % con G y disminuyó 0.3 % con NTC. Referente al espumante FPE-50 la densidad también aumentó con la A-L-lisina un 1.7 %, 0.3 % con grafito y disminuyó 0.2 % con NTC.

# CAPITULO IV – Resultados y Discusión

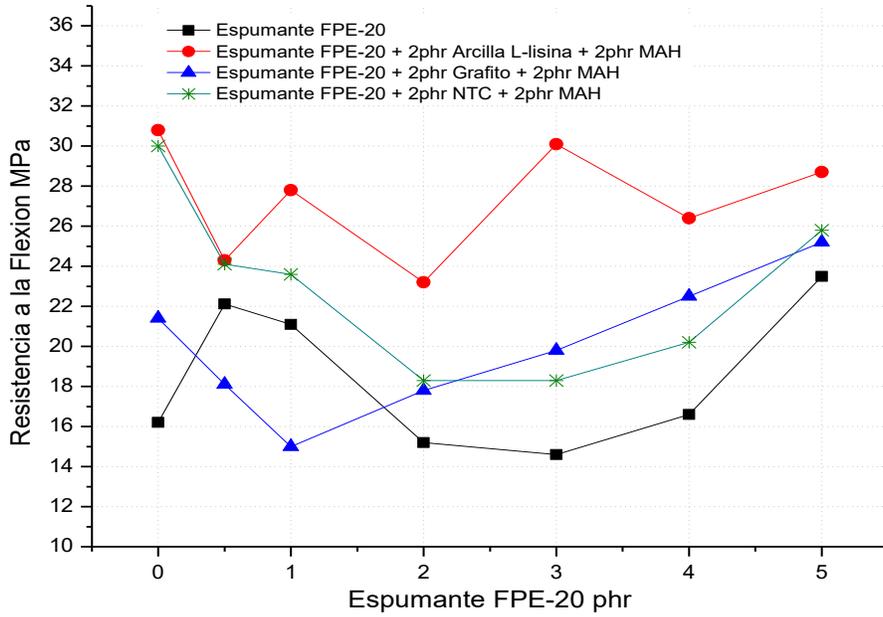


Figura 4.1 Resistencia a la flexión vs. Espumante FPE-20 phr.

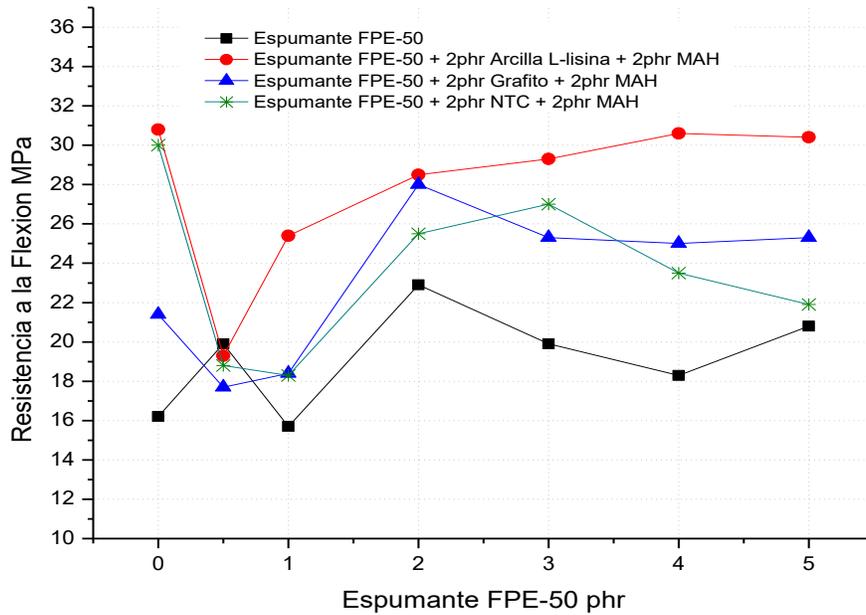


Figura 4.2 Resistencia a la flexión vs. Espumante FPE-50 phr.

# CAPITULO IV – Resultados y Discusión

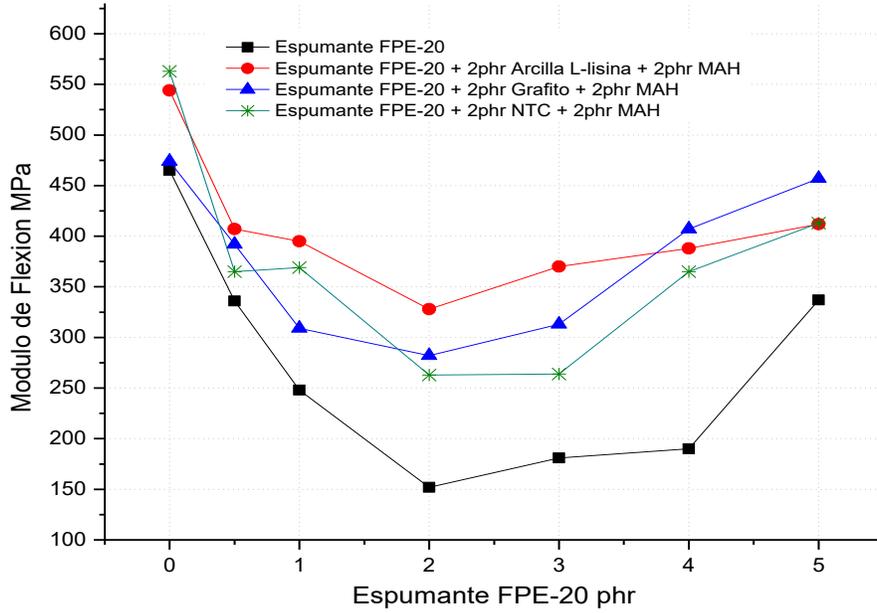


Figura 4.3 Módulo de flexión vs. Espumante FPE-20 phr.

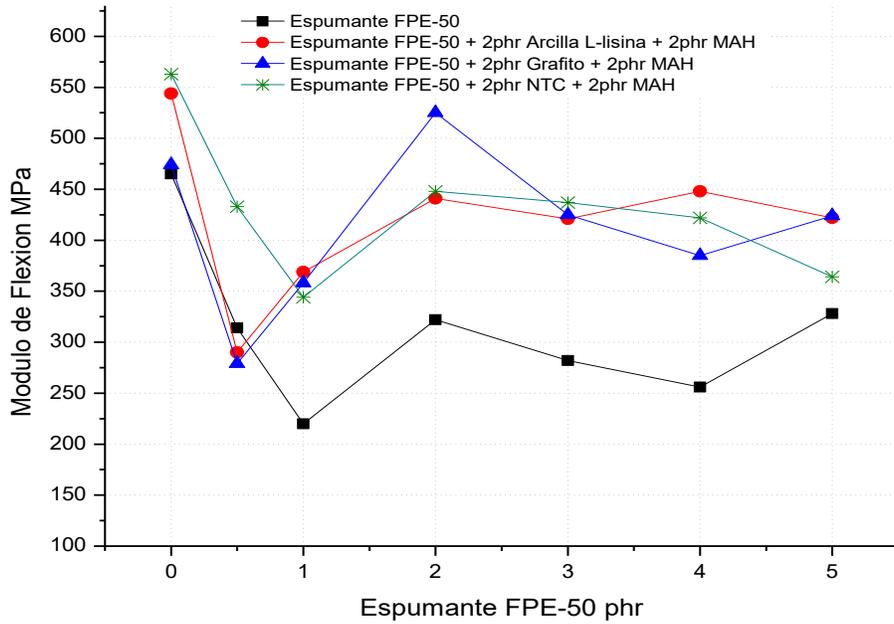


Figura 4.4 Módulo de flexión vs. Espumante FPE-50 phr.

# CAPITULO IV – Resultados y Discusión

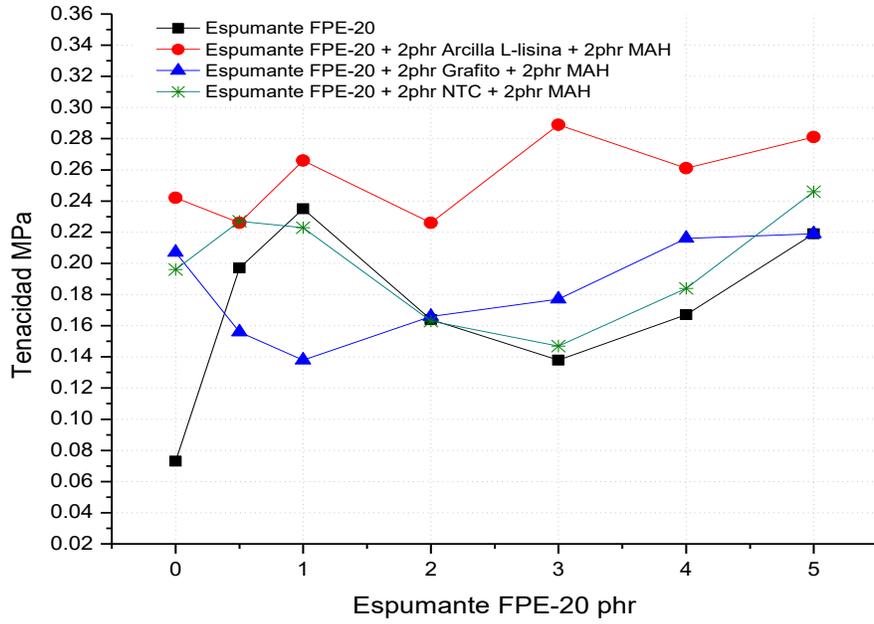


Figura 4.5 Tenacidad vs. Espumante FPE-20 phr.

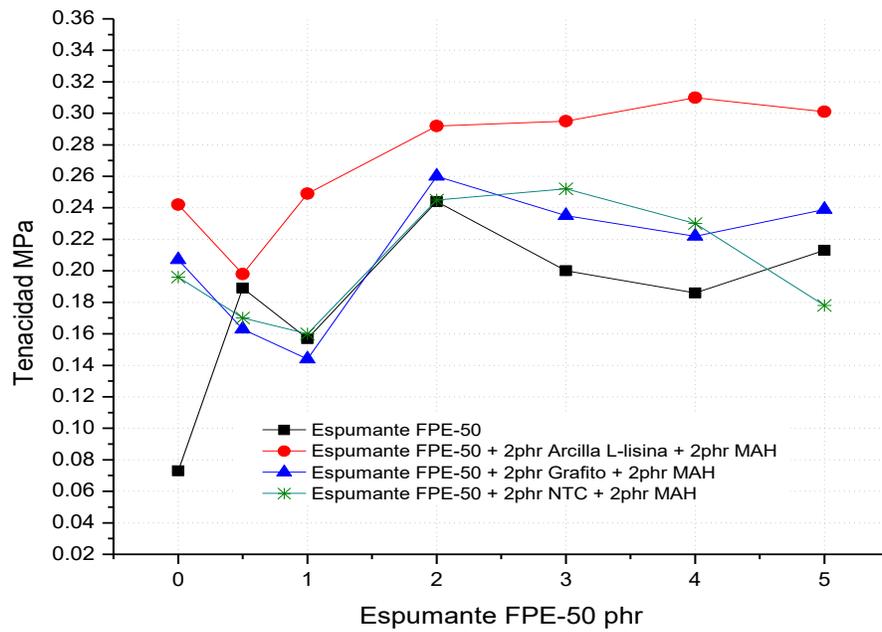


Figura 4.6 Tenacidad vs. Espumante FPE-50 phr.

# CAPITULO IV – Resultados y Discusión

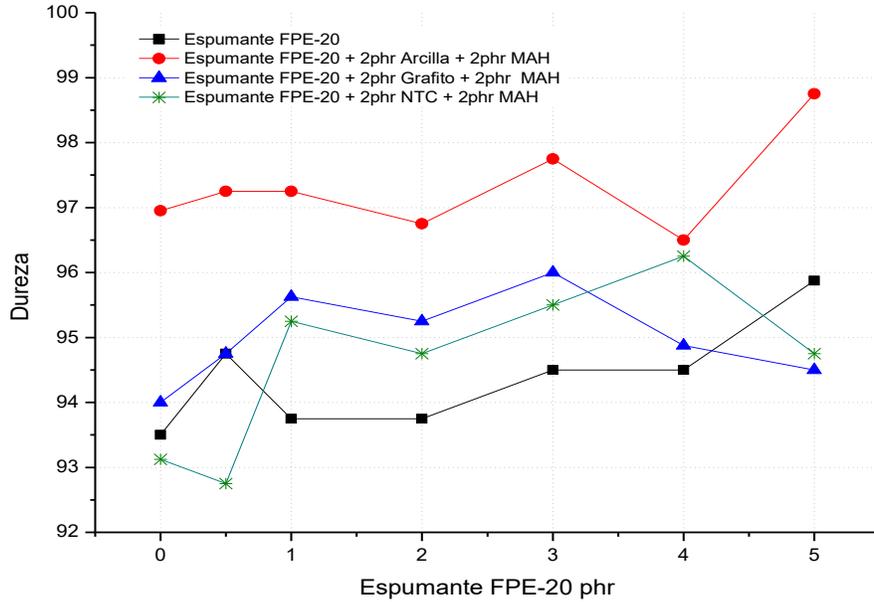


Figura 4.7 Dureza vs. Espumante FPE-20 phr.

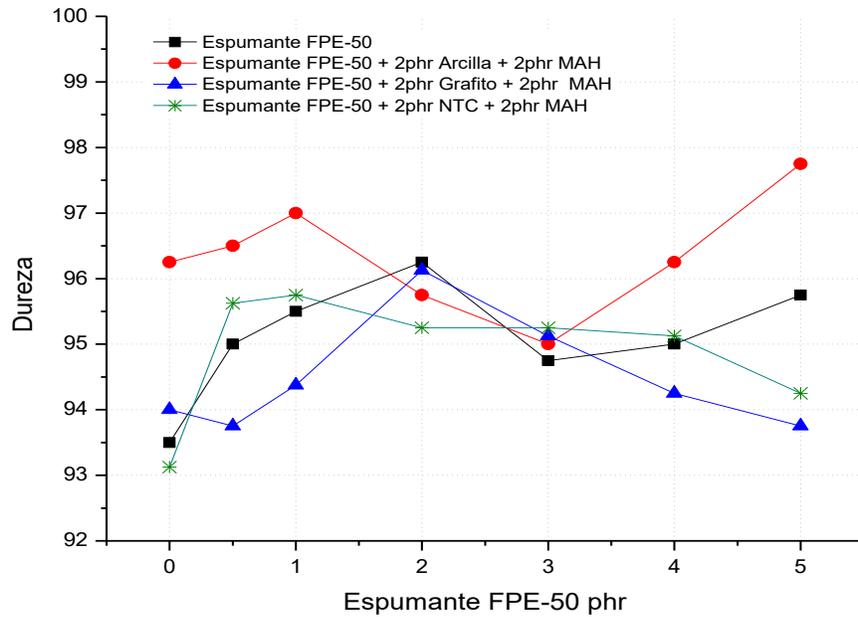


Figura 4.8 Dureza vs. Espumante FPE-50 phr.

# CAPITULO IV – Resultados y Discusión

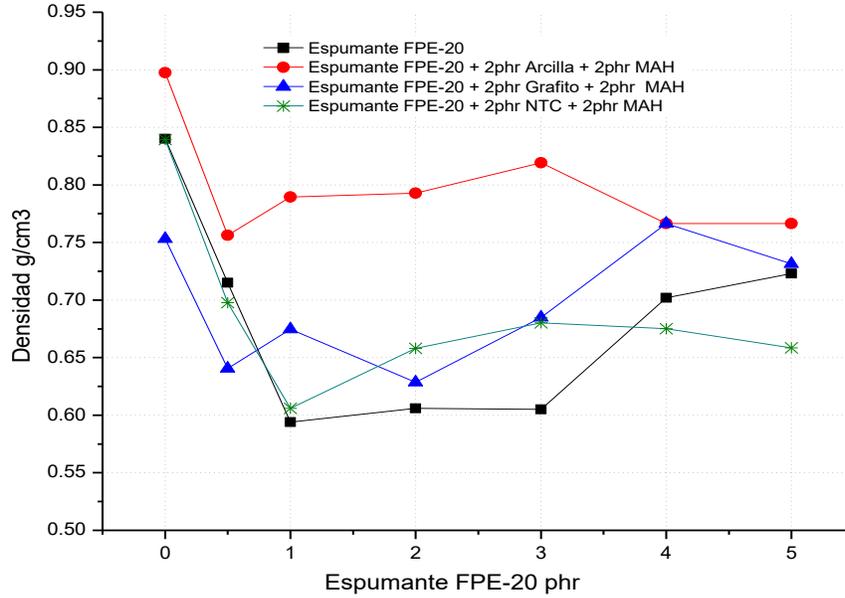


Figura 4.9 Densidad vs. Espumante FPE-20 phr.

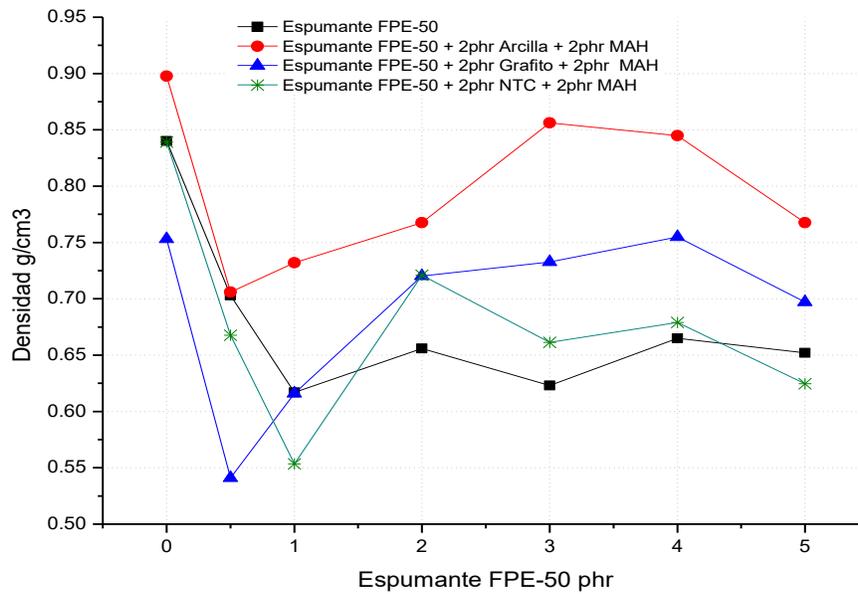


Figura 4.10 Densidad vs. Espumante FPE-50 phr.

## CAPITULO IV – Resultados y Discusión

### 4.2 Propiedades Térmicas

En las pruebas de termogravimetría se obtuvieron los termogramas (ver Anexo) en los cuales se observó que los materiales son estables a la temperatura de trabajo (menor a 346°C), en los termogramas la primera derivada nos indica la rapidez con la que se está degradando el polímero en función del aumento de temperatura, para el caso del PP sin ningún aditivo ni carga se obtuvo una rapidez de degradación de 2.29 %/°C.

En todos los nanocompuestos obtenidos hay un aumento respecto al valor de rapidez de degradación del PP, esto nos indica que los nanocompuestos obtenidos tienen mayor estabilidad térmica, esta estabilidad térmica se va incrementando conforme se va aumentando la cantidad de aditivo espumante, esto es en el caso del aditivo FPE-20, como se observa en la Tabla 4.1, la rapidez de degradación aumenta de 6.44 %, en la muestra 3, hasta un 52.83 % en el caso de la muestra 4.

La muestra con la cual se obtuvo la rapidez de degradación más alta, que fue de 3.5 %/°C, fue con el espumante FPE-20 con 5 phr de dicho espumante y con NTC.

*Tabla 4.1 Temperatura de comienzo de degradación y rapidez de degradación del espumante FPE-20.*

| Espumante FPE-20 |                                    |                                    |                               |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| # de Muestra     | Muestra                            | Comienzo de Degradación (Temp. °C) | Rapidez de degradación (%/°C) |
| 1                | PP                                 | 348                                | 2.29                          |
| 2                | PP+2phr Espumante+ G+MAH           | 346                                | 2.34                          |
| 3                | PP+2phr espumante+ NTC+MAH         | 359                                | 2.44                          |
| 4                | PP+5phr espumante+ NTC+MAH         | 394                                | 3.5                           |
| 5                | PP+5phr espumante+ A-L-lisina+ MAH | 398                                | 3                             |

## CAPITULO IV – Resultados y Discusión

En el caso del aditivo espumante FPE-50 la rapidez de degradación no aumenta de manera considerable como se observa en la Tabla 4.2, en la cual la muestra 2 tiene un aumento de 7.86 % y la muestra 4 tiene un aumento de 8.28 % referente al PP sin ningún aditivo y carga.

Tabla 4.2 Temperatura de comienzo de degradación y rapidez de degradación del espumante FPE-50.

| Espumante FPE-50 |                                    |                                    |                               |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| # de Muestra     | Muestra                            | Comienzo de Degradación (Temp. °C) | Rapidez de degradación (%/°C) |
| 1                | PP                                 | 348                                | 2.29                          |
| 2                | PP+2phr Espumante+ G+MAH           | 352                                | 2.47                          |
| 3                | PP+4phr espumante+ A-L-lisina+ MAH | 348                                | 2.63                          |
| 4                | PP+4phr espumante+ G +MAH          | 350                                | 2.48                          |
| 5                | PP+4phr espumante+ NTC+MAH         | 356                                | 2.47                          |

### 4.3 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

De la 4.11 a la Figura 4.23 se observa la distribución y tamaño de las celdas con cada una de las cargas, se puede observar que las celdas más uniformes en tamaño y mejor distribuidas son las que contienen A-L-lisina con ambos aditivos espumantes. También se puede observar que el espumante obtenido es de celda cerrada. Es importante mencionar que las celdas grandes (Figuras a) están compuestas por celdas más pequeñas (Figuras b), se tomaron en cuenta ambos tamaños de celda.

Las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 tiene la misma cantidad de aditivo espumante FPE-20 lo único que las diferencia son las cargas. Y las Figuras 4.14 a la 4.17 contienen la misma cantidad de espumante FPE-50 y de igual manera la diferencia entre estas son las cargas que se emplearon.

## CAPITULO IV – Resultados y Discusión

---

En las Figuras 4.11 (a) y (b) se puede observar el tamaño y distribución de las celdas, sin ninguna carga únicamente es PP, espumante FPE-20 y MAH. Estas celdas presentan una distribución y tamaño muy irregular, tanto en las celdas grandes y las celdas pequeñas.

Las Figuras 4.12 (a) y (b) nos muestran la morfología del PP espumado con A L-lisina y se observa que el tamaño de las celdas tanto grandes como pequeñas, respectivamente, presentan una distribución y tamaño más homogéneo.

En las Figuras 4.13 (a) y (b) se observa la distribución y tamaño de las celdas grandes y pequeñas con NTC, estas celdas son menos uniformes en comparación con los compuestos que contienen A-L-lisina y G.

En las Figuras 4.14 (a) y (b) se muestra la morfología de las celdas grandes y pequeñas únicamente con espumante FPE-50 y MAH. Estas celdas al igual que en las figuras 4.11 (a) y (b) las celdas presentan una distribución y tamaño muy irregular.

Las Figuras 4.15 (a) y (b) muestran la distribución y tamaño de las celdas del PP espumado con A-L-lisina, se observa que estas celdas tienen un tamaño y distribución más homogénea en comparación con las Figuras 4.14, 4.16 y 4.17.

En las Figuras 4.16 (a) y (b) se observa el tamaño y distribución de las celdas grandes y pequeñas con grafito, estas celdas son menos irregulares en comparación con el compuesto que contiene NTC.

Finalmente en las Figuras 4.17 (a) y (b) se puede observar la distribución y tamaño de las celdas con NTC, estas celdas tienen el comportamiento más irregular en comparación con las cargas de A-L-lisina y grafito.

## CAPITULO IV – Resultados y Discusión

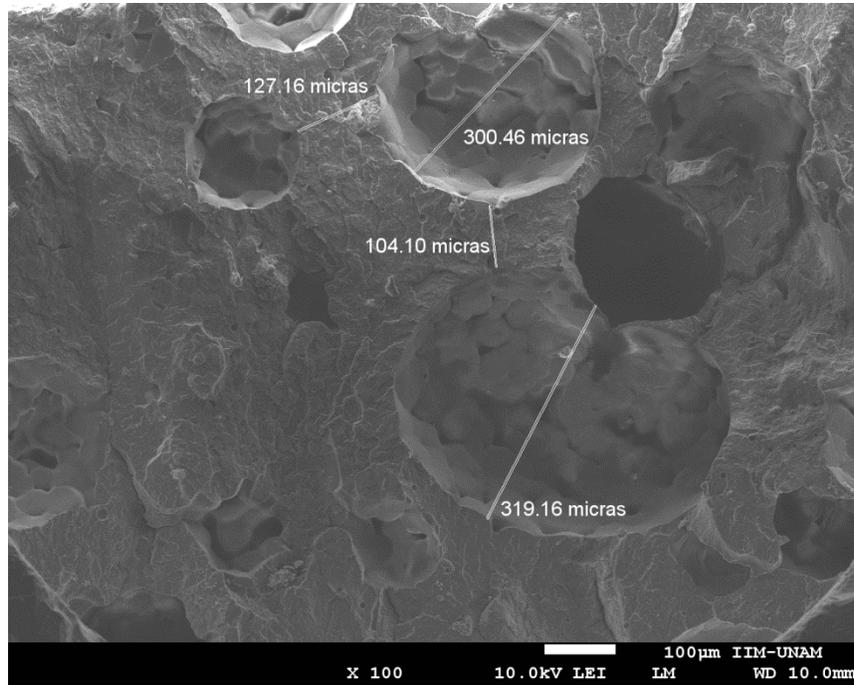


Figura 4.11 (a) PP + Espumante FPE-20 + 5, celdas grandes.

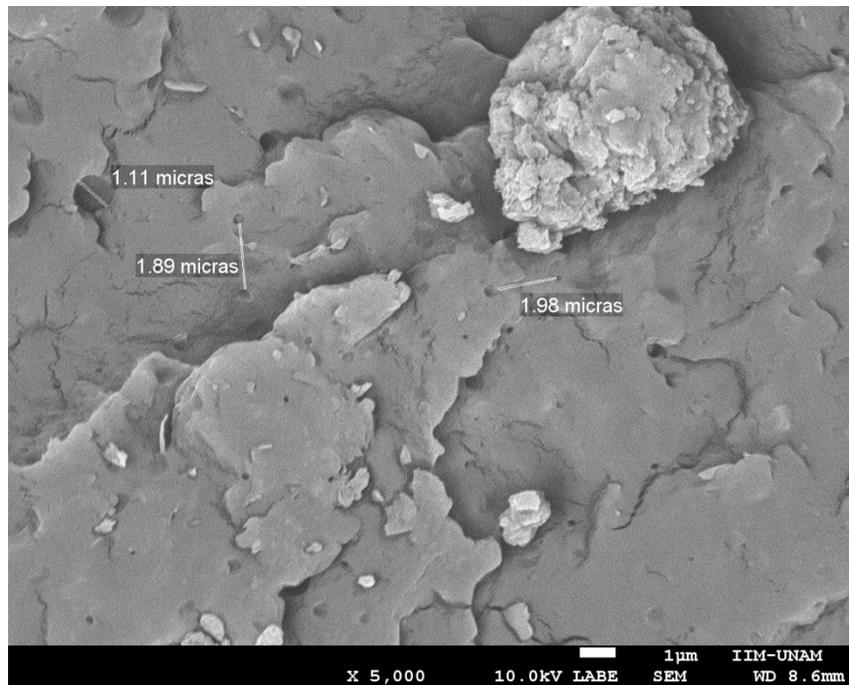


Figura 4.11 (b) PP + Espumante FPE-20 + 5, celdas pequeñas.

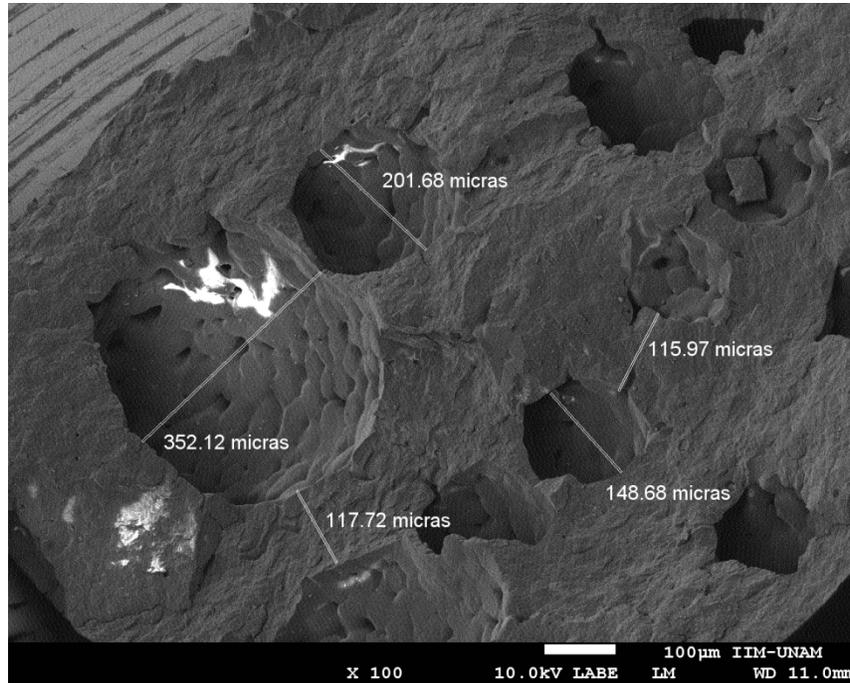


Figura 4.12 (a) PP + Espumante FPE-20 + 5 + A-L-lisina + MAH, celdas grandes.

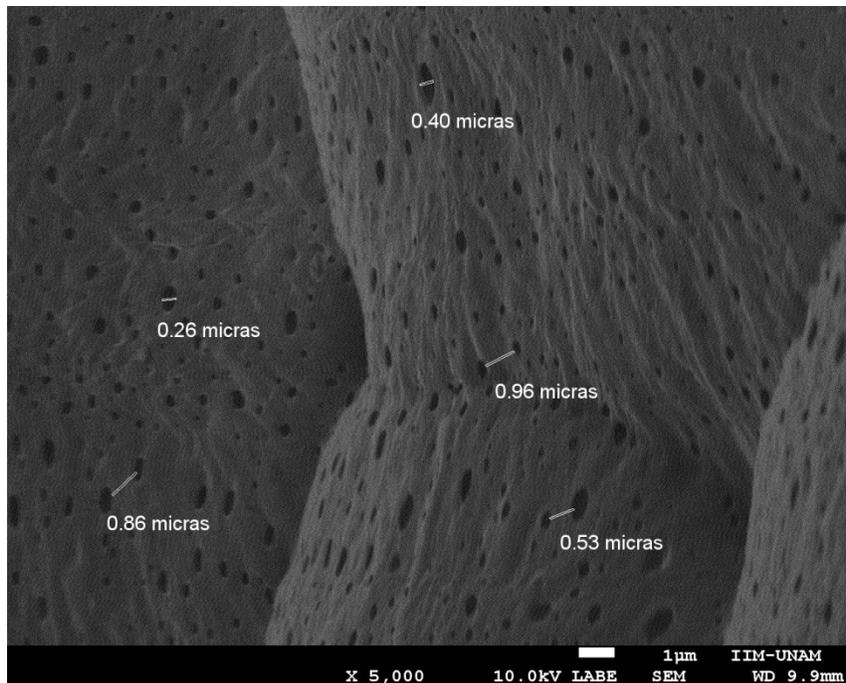


Figura 4.12 (b) PP + Espumante FPE-20 + 5 + A-L-lisina + MAH, celdas pequeñas.

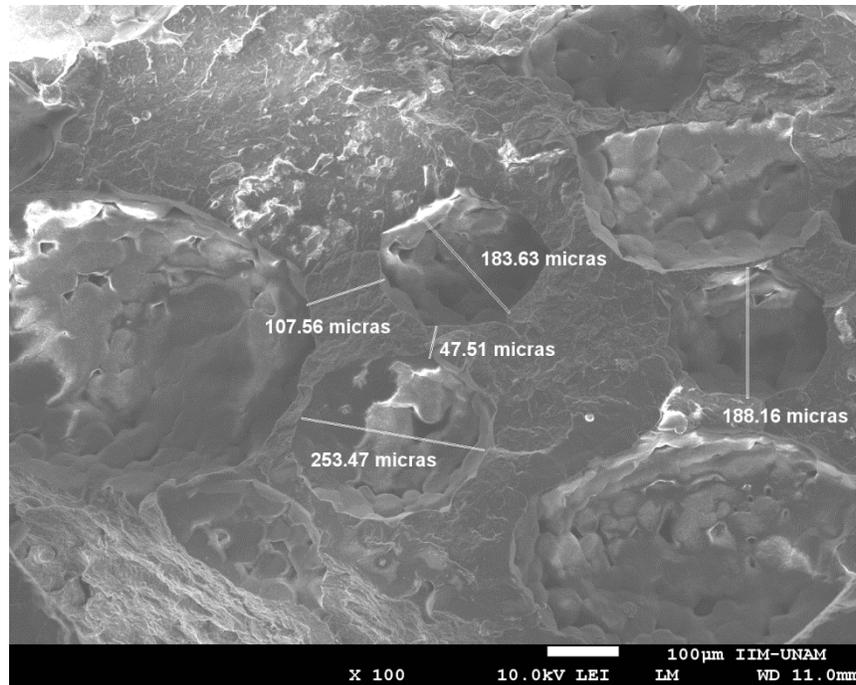


Figura 4.13 (a) PP + Espumante FPE-20 + 5 +NTC + MAH, celdas grandes.

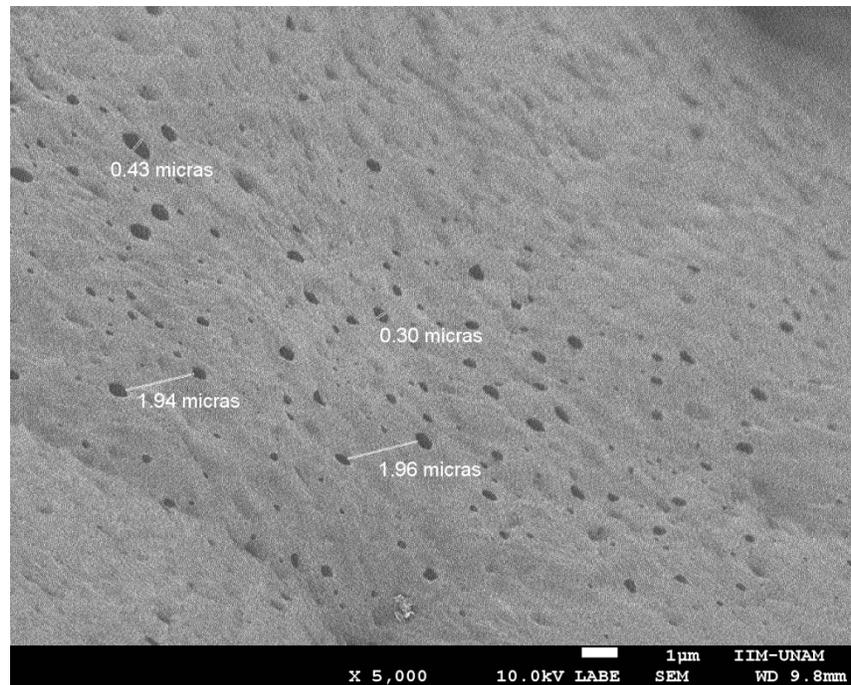


Figura 4.13 (b) PP + Espumante FPE-20 + 5 +NTC + MAH, celdas pequeñas.

## CAPITULO IV – Resultados y Discusión

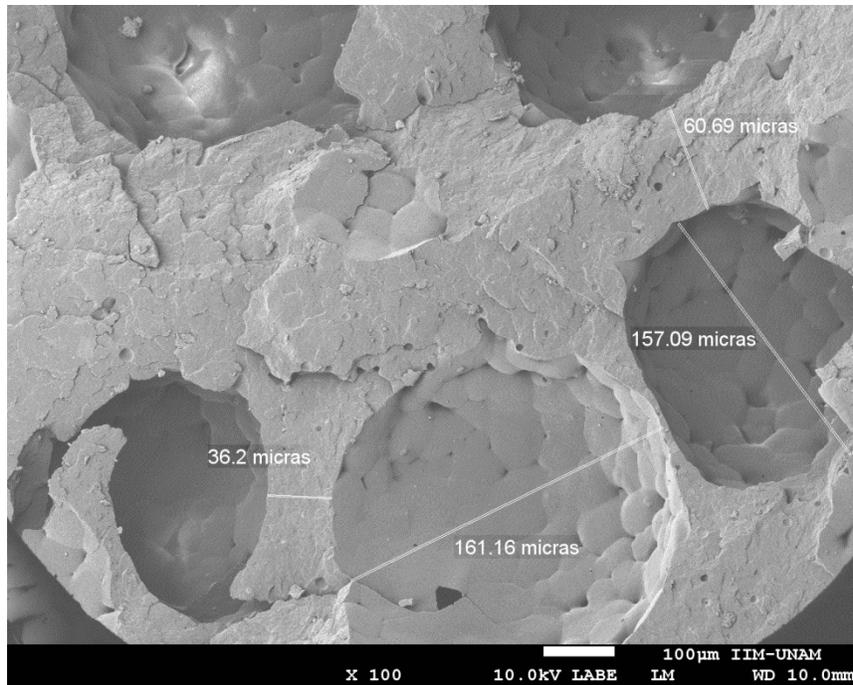


Figura 4.14 (a) PP + Espumante FPE-50 + 4, celdas grandes.

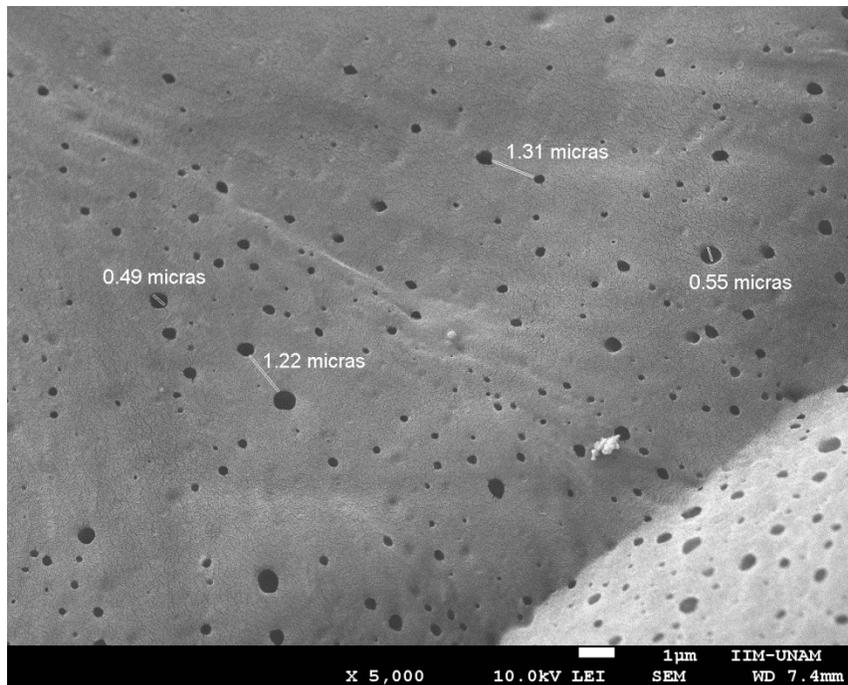


Figura 4.14 (b) PP + Espumante FPE-50 + 4, celdas pequeñas.

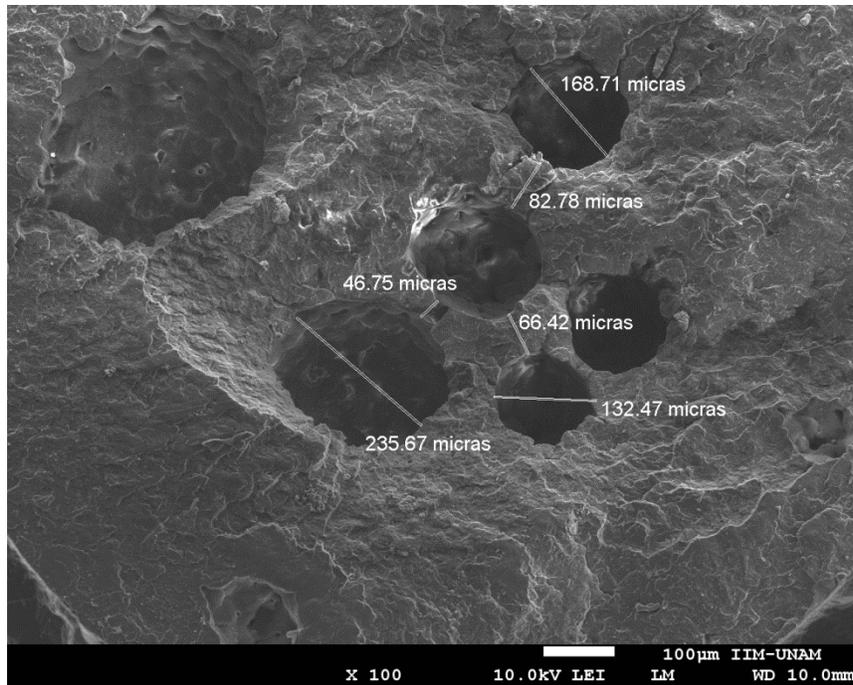


Figura 4.15 (a) PP + Espumante FPE-50 + 4 + A-L-lisina + MAH, celdas grandes.

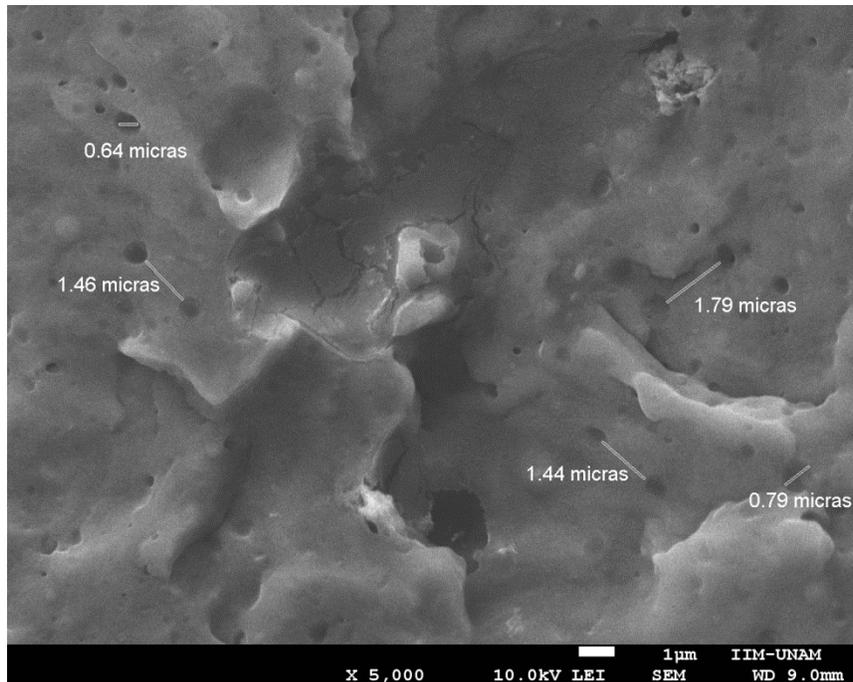


Figura 4.15 (b) PP + Espumante FPE-50 + 4 + A-L-lisina + MAH, celdas pequeñas.

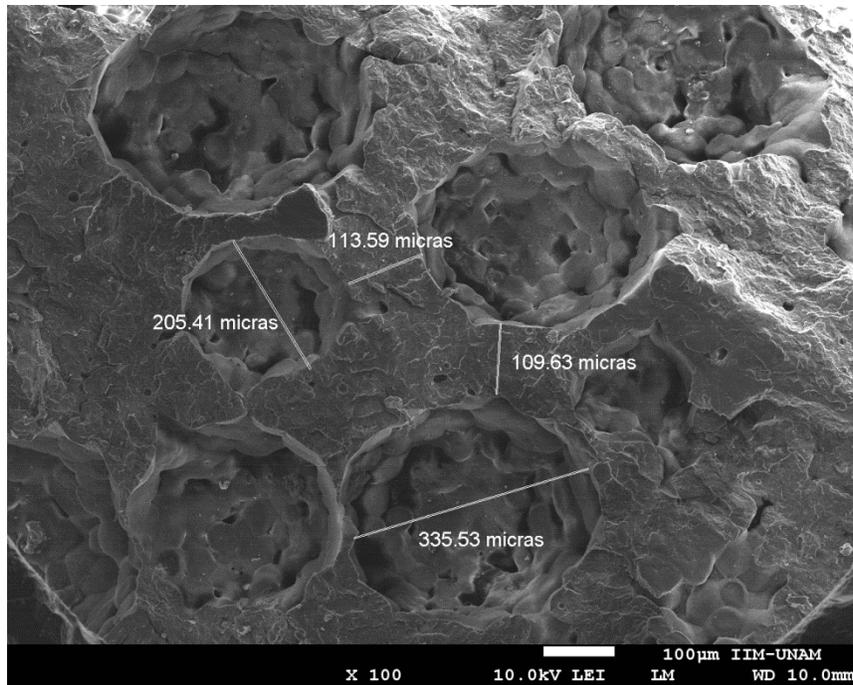


Figura 4.16 (a) PP + Espumante FPE-50 + 4 + G + MAH, celdas grandes.

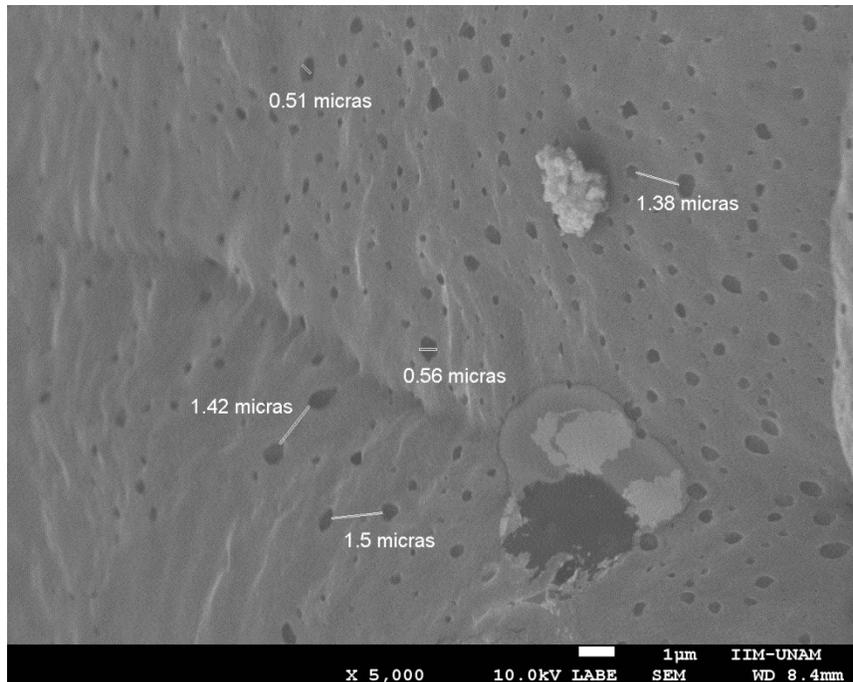


Figura 4.16 (b) PP + Espumante FPE-50 + 4 + G + MAH, celdas pequeñas.

## CAPITULO IV – Resultados y Discusión

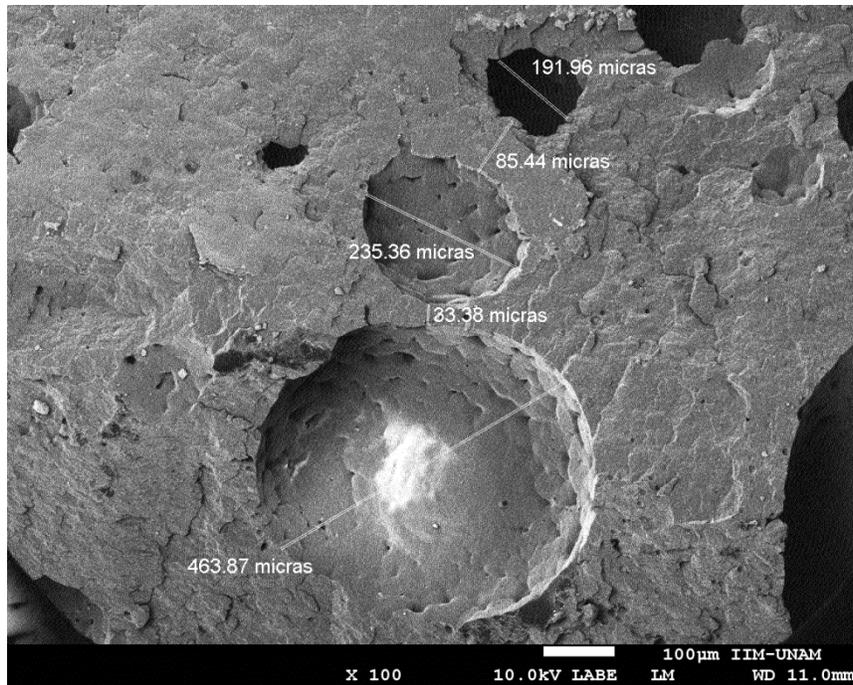


Figura 4.17 (a) PP + Espumante FPE-50 + 4 + NTC + MAH, celdas grandes.

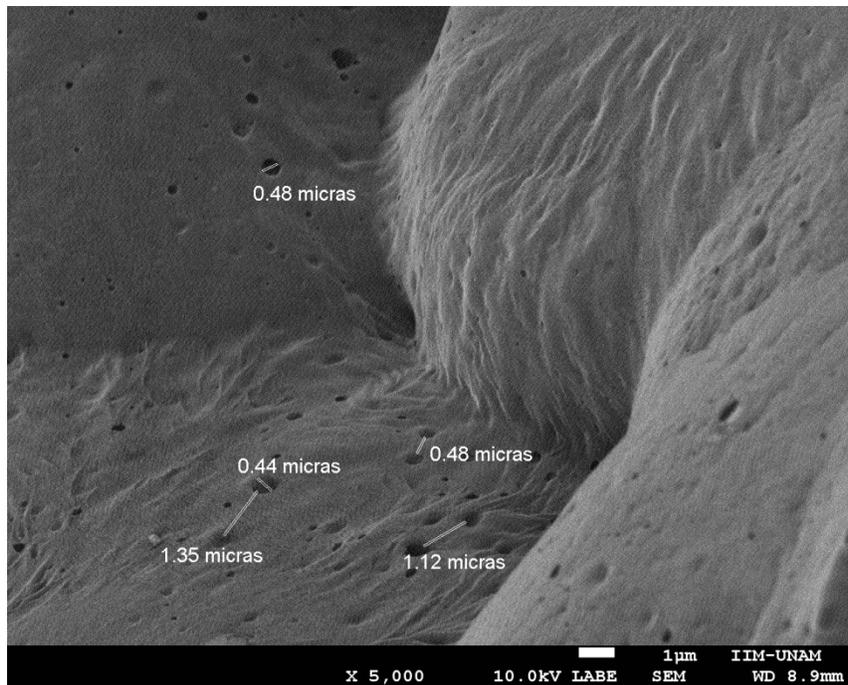


Figura 4.17 (b) PP + Espumante FPE-50 + 4 + NTC + MAH, celdas pequeñas..

### Capítulo V

### Conclusiones

- 1) La hipótesis planteada se cumplió.
- 2) Los mejores resultados obtenidos con el espumante FPE-20 fueron con la carga de A-L-lisina. Se aumentó 47.9% la resistencia a la flexión, 48.8 % el modulo de flexión, 50.1 % la tenacidad y 3.1 % la dureza. Se disminuyó la densidad únicamente con NTC un 0.3 %.
- 3) Con respecto al espumante FPE-50, con A-L-lisina se incrementó 45.3 % la resistencia a la flexión, 34.2 % el modulo de flexión, 49.5 % la tenacidad y 1.3 % la dureza. Nuevamente se disminuyó la densidad únicamente con NTC un 0.2 %.
- 4) Las formulaciones que tienen una mejor resistencia a la flexión así como en el módulo de flexión, tenacidad y dureza son las que contienen A-L-lisina con el espumante FPE-20.
- 5) Con base a los resultados obtenidos, las formulaciones con NTC presentaron propiedades bajas, en comparación con A-L-lisina y G. Excepto en la densidad, ya que con esta carga se obtuvo el nanocompuesto más ligero, con ambos espumantes, principalmente con el espumante FPE-50.
- 6) Con la carga de G las propiedades determinadas presentaron valores comprendidos entre las reportadas para A-L-lisina y NTC.

- 7) Los resultados obtenidos en los termogramas indican que las formulaciones PP20+5NTC y PP20+5AC son las más resistentes al inicio de la degradación ya que empiezan ésta a 394°C y 398°C respectivamente, sin embargo, presentan la rapidez de degradación más alta con un valor de 3.5 %/°C en el caso de PP20+5NTC y 3 %/°C en PP20+5AC.
- 8) La rapidez de degradación, con ambos aditivos espumantes, es directamente proporcional a la cantidad de espumante, ya que las formulaciones con 0.5 phr de espumante presentaron menor rapidez de degradación y con 5 phr mayor rapidez de degradación, siendo más notorio este aumento con el espumante FPE-20.
- 9) El espumante con el cual se obtuvieron mejores resultados en todas las propiedades determinadas fue con el espumante FPE-20.
- 10) Las micrografías muestran que el tamaño de la celda y la pared de la misma son parámetros importantes que afectan el compuesto. Se determinó que si la celda es pequeña la pared lo es también. Cuando esto se cumple se obtienen las mejores propiedades, como en el caso de A-L-lisina.
- 11) Los resultados experimentales indican que las nanopartículas tienen un impacto positivo en la mejora de la morfología de las celdas, la densidad y en la expansión de las celdas de las espumas de PP.
- 12) Con ambos espumantes se obtuvieron mejoras en las propiedades fisicomecánicas y morfología de las celdas. Con el espumante FPE-50 en concentraciones de 2 y 4 phr y con el espumante FPE-20 en concentraciones de 2 y 5 phr.

# Trabajo Futuro

Se debe realizar un experimento con la técnica de extrusión-ultrasonido para mejorar la dispersión y distribución de las partículas en las paredes de las celdas. Esto contribuirá a mejoras en las propiedades fisicomecánicas del compuesto espumado.

Se estudiará el efecto de dispersión y distribución de las partículas con otro tipo de extrusores, como el de mono husillo con ultrasonido.

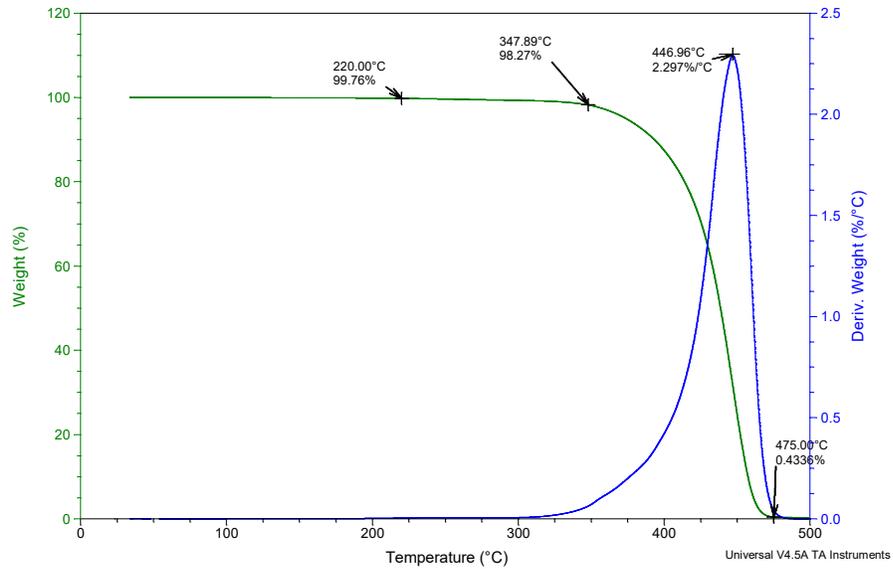
# Termogramas

## Termograma de PP

Sample: PP TGA 10 N2 11FEB16  
Size: 15.3540 mg

TGA

File: C:\...PP TGA 10 N2 11FEB16.002  
Operator: DCP  
Run Date: 12-Feb-2016 09:25  
Instrument: TGA Q5000 V3.17 Build 265

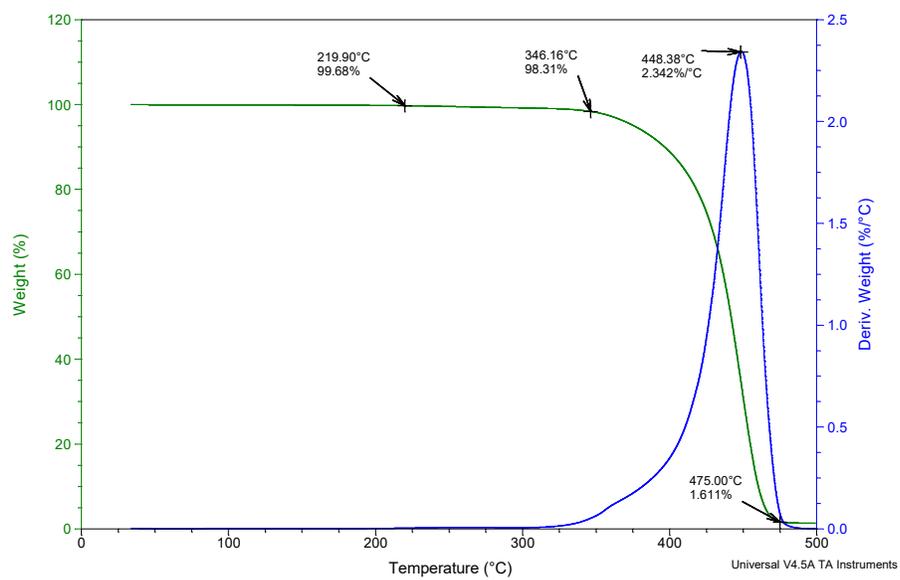


## Termograma de PP20+2+G+MAH

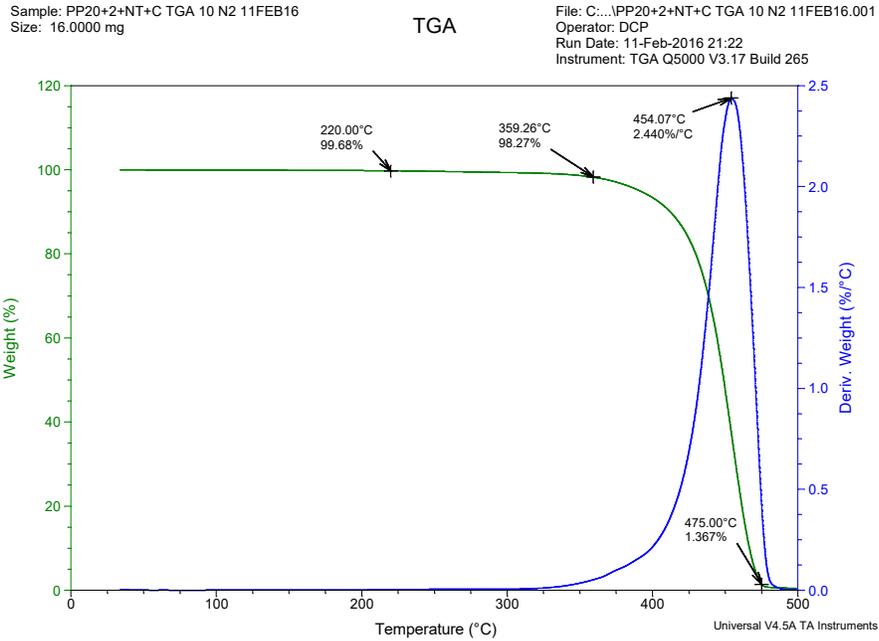
Sample: PP20+2+G+C TGA 10 N2 11FEB16  
Size: 13.7020 mg

TGA

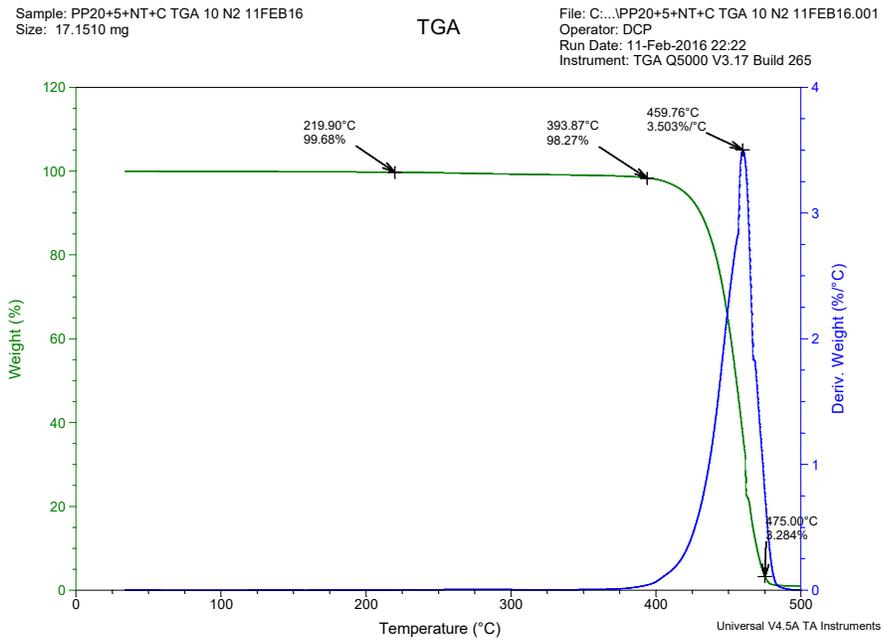
File: C:\...PP20+2+G+C TGA 10 N2 11FEB16.001  
Operator: DCP  
Run Date: 12-Feb-2016 03:24  
Instrument: TGA Q5000 V3.17 Build 265



### Termograma de PP20+2+NTC+MAH



### Termograma de PP20+5+NTC+MAH



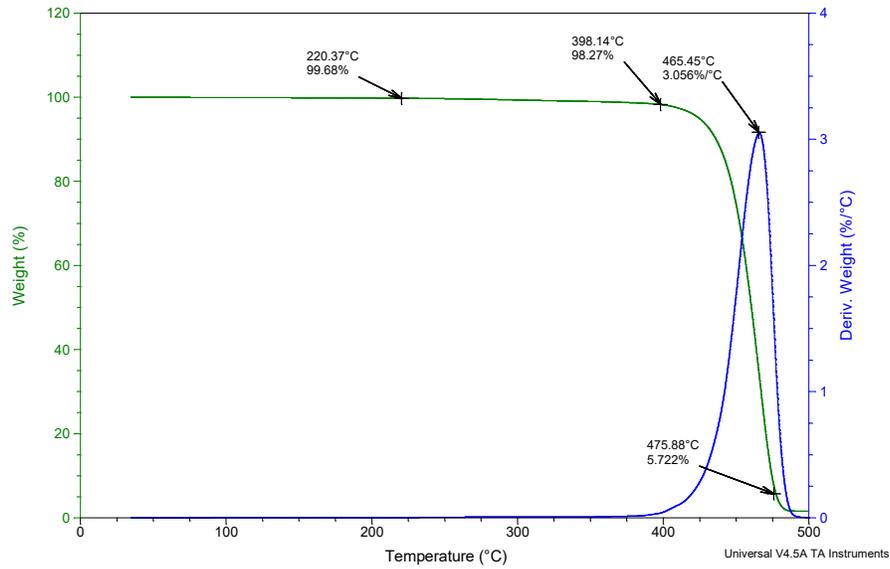
### Termograma de PP20+5+A L-lisina+ MAH

Sample: PP20+5+A+C TGA 10 N2 15MZO16  
Size: 26.4330 mg

TGA

File: C:\...PP20+5+A+C TGA 10 N2 15MZO16.001

Run Date: 15-Mar-2016 18:48  
Instrument: TGA Q5000 V3.17 Build 265



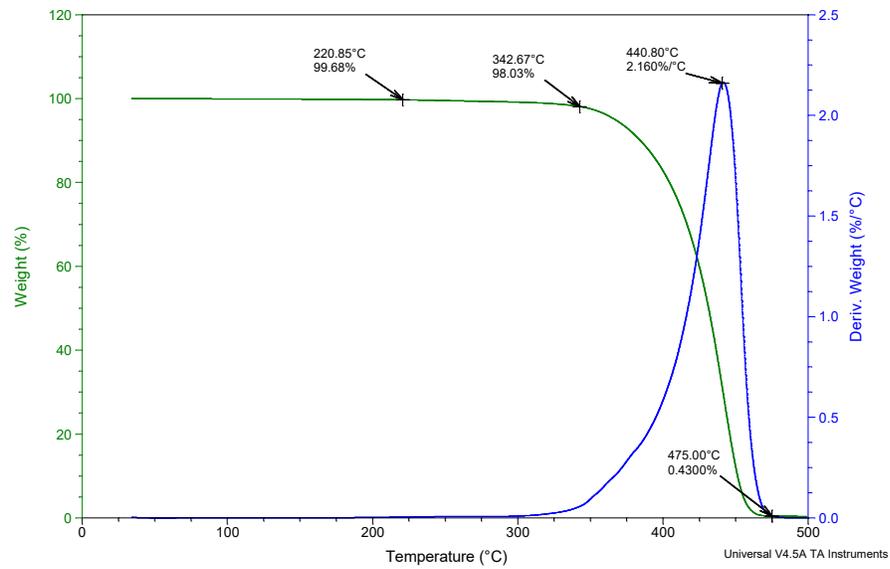
### Termograma de PP20+5

Sample: PP20+5 TGA 10 N2 11FEB16  
Size: 12.8430 mg

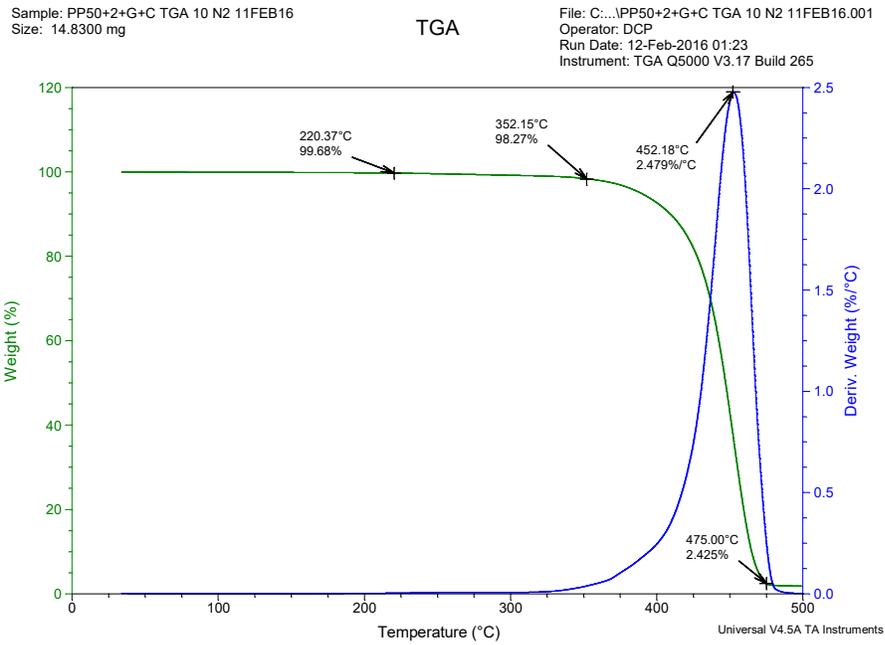
TGA

File: C:\...PP20+5 TGA 10 N2 11FEB16.001

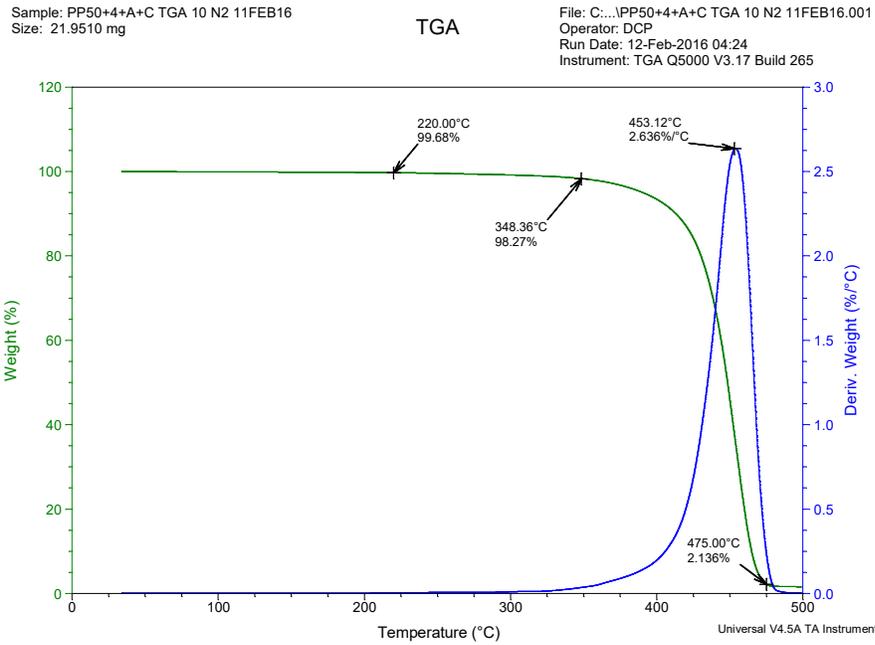
Operator: DCP  
Run Date: 11-Feb-2016 17:20  
Instrument: TGA Q5000 V3.17 Build 265



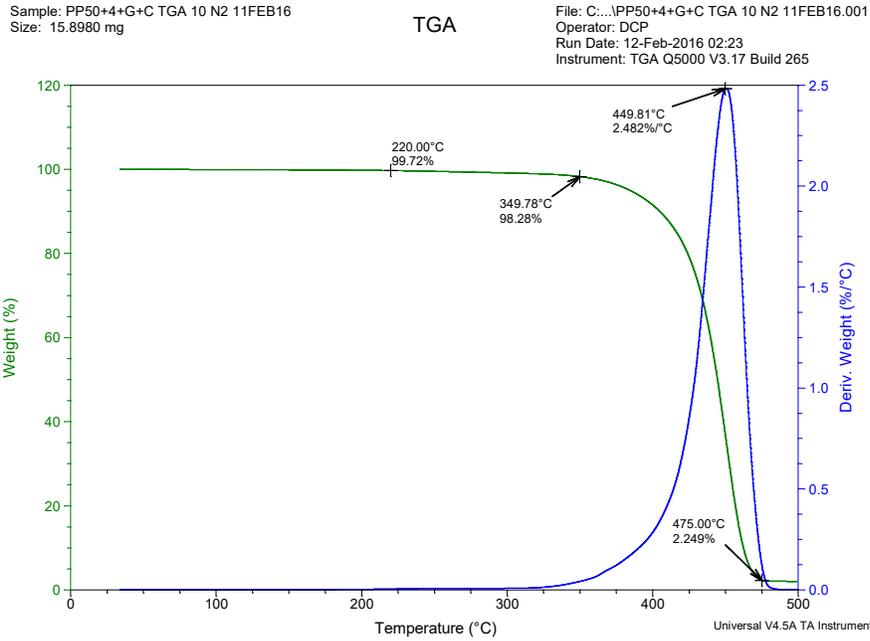
### Termograma de PP50+2+G+MAH



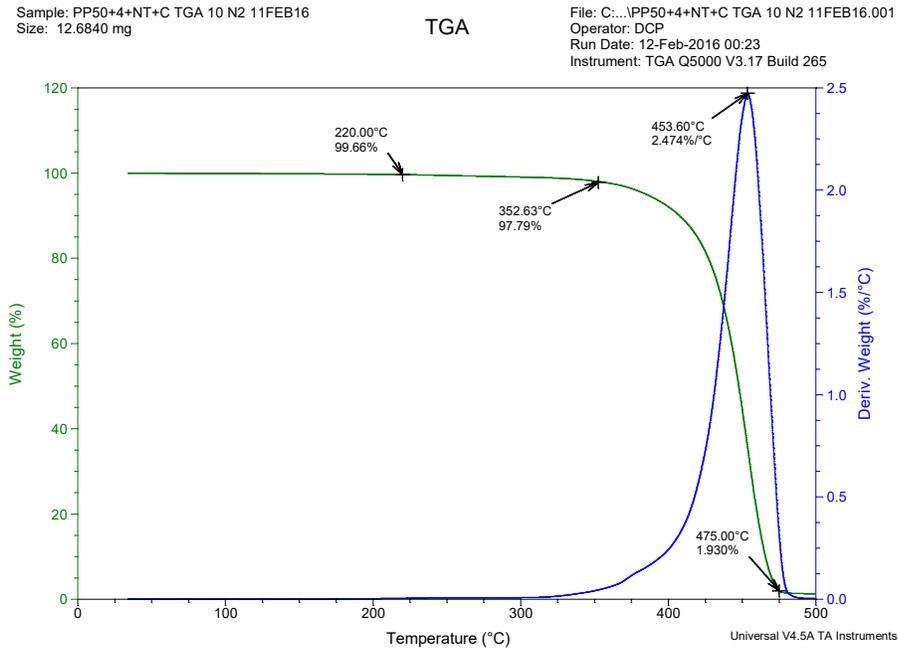
### Termograma de PP50+4+A L-lisina+ MAH



### Termograma de PP50+4+G+MAH



### Termograma de PP50+4+NTC+MAH



# Bibliografía

- [1] Raimond B. Seymour, Charles E. Carraher, "Introducción a la Ciencia de los Polímeros", Ed. Reverte Barcelona, Bogotá, 1998, Pág. 1-6, 122-132.
- [2] Francisco López Serrano, Eduardo Mendizabal Mijares. "Introducción a la Ciencia de los Polímeros", Primera Edición, 2015, Pág. 2-11.
- [3] Daniel Romero Nieto, "Nanocompuestos de Espuma Rígida de Poliuretano", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2007.
- [4] Robert J. Young and Peter A. Lovell. "Introduction to Polymers", Third Edition. Ed. Taylor & Francis Group. London, New York, 2011, Pág. 9-12, 383-400, 591, 614.
- [5] Sajid Alavi, Sabu Thomas, Et al. "Polymers for Packaging Applications", Ed. Apple Academic Press, Toronto New Jersey, 2015, Pág. 12-20.
- [6] Cowie, Arrighi. "Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials", Third Edition, Ed. CRC Press. USA, 2008, Pág. 21-24, 321-322.
- [7] Christopher C. Ibeh, "Thermoplastic Materials, Properties, Manufacturing Methods, and Applications", Ed. CRC Press. London, 2011, Pág. 579, 582-587.
- [8] T. J. Pinnavaia and G. W. Beall, "Polymer-Clay Nanocomposites", Ed. John Wiley & Son Ltd, New York, USA, 2000, Pág. 4.
- [9] M. Okamoto, P. H. Nam, P. Maiti, et al., "Biaxial Flow-Induced Alignment of Silicate Layers in Polypropylene/Clay Nanocomposite Foam", Nano Letters, Vol. 1, No.9, 2001.
- [10] Sandra Aline Sánchez Vázquez, "Desarrollo de nanocompuesto de polipropileno reciclado, arcilla bentonita químicamente modificada con L-lisina monohidroclorada y fibra de vidrio", Tesis Profesional. Facultad de Química. UNAM, 2010.
- [11] Walter E. Driver, "Química y Tecnología de los Plásticos", Ed Continental, México, (1991), Pág. 105-109, 123, 203.
- [12] "FOMEX" Línea de Productos de Espumas Poliolféfnicas de México [En línea] Fecha de actualización: 2010, [Fecha de consulta: 12/03/2016]. Disponible en: <http://www.citechnifoam.com/index.html>

- [13] Cristina Saiz Arroyo, "Fabricación de Materiales Celulares Mejorados Basados en Poliiolefinas. Relación Procesado-Composición-Estructura-Propiedades", Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid, 2012.
- [14] YU Liping, ZHU Qiqiang, YU Jianying. "Development and Application of Expanded Polypropylene Foam", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Ed Sci, Vol. 28 No.2, Abr.2013.
- [15] GONG Wei, ZHANG Chun, YU Jie, HE Ying, HE Li., "Injection Processing and Foaming Behaviors of Polypropylene Composite Foams", Journal of Natural Sciences, Vol.19, No.2, 2014.
- [16] Hani E. Naguib, Chul B. Park, N. Reichelt., "Fundamental Foaming Mechanisms Governing the Volume Expansion of Extruded Polypropylene Foams", Journal of Applied Polymer Science, Vol 91, No.2, 2004.
- [17] Manas Chanda, Salil K. Roy, "Industrial Polymers, Speciality Polymers and Their Applications", Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, New York. 2009, Pág. 1-9.
- [18] "Enciclopedia del Plástico", Instituto Mexicano del Plástico Industrial, S.C (IMPI), México, 1997, Capítulo IV.
- [19] Irvin I. Rubin, "Materiales Plásticos, Propiedades y Aplicaciones", Ed. Limusa, México, 2009, Pág. 93-113.
- [20] Vikas Mittal, "Advances in Polyolefin Nanocomposites", Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2011, Pág. 11-24.
- [21] Luis David Arias Jaime, "Procesamiento y Formulación de Mezclas y Nanocompuestos de Polietilentereftalato y Polipropileno Reciclado", Tesis Profesional, Facultad de Química, UNAM, 2010.
- [22] Christopher C. Ibeh, "Thermoplastic Materials, Properties, Manufacturing Methods, and Applications", Ed. CRC Press, New York, 2011, Pág. 199-209.
- [23] "Reacción de Polimerización del Polipropileno" [En línea] Textos científicos. Fecha de actualización: MAR, 15/12/2009 [Fecha de consulta 11/03/2016]. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polipropileno/polimerizacion>
- [24] "Procesos de Fabricación del Polipropileno" [En línea] Textos científicos. Fecha de actualización: LUN, 15/08/2005 [Fecha de consulta 11/03/2016]. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polipropileno/fabricacion>

- [25] García Emilia, Suárez Mercedes, “Las Arcillas Propiedades y Usos”, [En línea] Universidad de Salamanca. [Fecha de consulta 08/03/2016] Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm>
- [26] “Bentonita de Perforación, Cálcica y Sódica” [En línea], FEMISA, Fecha de actualización: 24.11.2011 [Fecha de consulta: 12/03/2016]. Disponible en: <http://3215.mx.all.biz/bentonita-de-perforacin-calcica-y-sdica-g16368>
- [27] “Bentonita del Lago” [En línea], Castiglioni Pes y Cia. SAFIAMI [Fecha de consulta: 12/03/2016]. Disponible en: <http://www.bentonita-dellago.com.ar>
- [28] Rodas Magdalena “Bentonita”, [En línea], [Fecha de consulta 14/03/2016], Disponible en: [www.concretonline.com/pdf/08mineria/art\\_tec/Bentonitas\\_1.pdf](http://www.concretonline.com/pdf/08mineria/art_tec/Bentonitas_1.pdf)
- [29] Norio Kitadai, Tadashi Yokoyama, Satoru Nakashima., “In Situ ATR\_IR Investigation of L-lysine adsorption on Montmorillonite”, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 338, No. 2, 2009.
- [30] Cuadros Javier, Aldega Luca, Vetterlein Jonathan., “Reactions of Lysine with Montmorillonite at 80°C: Implications for Optical Activity, H<sup>+</sup> transfer and Lysine- Montmorillonite binding”, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 333, No. 1, 2009.
- [31] Parbhakar Anita, Cuadros Javier, Sephton Mark A., “Adsorption of L-lysine on Montmorillonite, Colloids and Surfaces A: Physicochem”, Eng. Aspects Vol. 133, No.2, 2007.
- [32] Nuria Merino del Amo, “Fabricación y Caracterización de Materiales Compuestos de Matriz Metálica Reforzados con Nanofibras de Carbono”, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, 2010.
- [33] Edgar Abarca Morales, “Síntesis, Funcionalización y Caracterización de Papel de Nanotubos de Carbono (Buckypaper)”, Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM, 2016.
- [34] “Anhídrido Maléico” [En línea], [Fecha de consulta: 15/03/2016], Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia6.pdf>
- [35] Dean Shi, Jinghui Yang, Zhanhai Yao, Yong Wang, Honglian Huang, Wu Jiang, Polymer 42,55495557, 2001.
- [36] Malcom P. Stevens, Polymer Chemistry, Oxford University Press, Ed Third, New York 1999, Pág. 169-170.

- [37] Maribel Beltran Rico, Antonio Marcilla Gomis., “Tecnología de Polímeros, Procesado y Propiedades”, Publicaciones de la Universidad de Alicante, España 2012.
- [38] William D. Callister, Jr. “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2”, Ed. Reverte Barcelona. España, 2007, Pág. 492.
- [39] ASTM D790-02 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- [40] María Cinta Vincent Vela, Silvia Alveraz Blanco, José Luis Zaragoza Carbonel. “Ciencia y Tecnología de Polímeros”, Editorial UPV, 2006, Pág. 73.
- [41] M. Antunes, V. Realinho, and J. I. Velasco., “Foaming Behaviour, Structure, and Properties of Polypropylene Nanocomposites Foams”, Journal Nanomaterials, Vol. 299, No.1, 2010.
- [42] Miguel Ángel Rodríguez Pérez, “Propiedades Térmicas y Mecánicas de Espumas de Poliolefinas”, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid, Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía. 1998.
- [43] “Reedy Products // Safoam® Chemical Foaming Agents” [En línea], [Fecha de consulta: 16/03/2016], Disponible en: [http://www.reedyintl.com/products/safoam\\_tsb.php](http://www.reedyintl.com/products/safoam_tsb.php)