

182ej

# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

**FACULTAD DE QUIMICA**



**ESTUDIO TECNICO PARA LA INCORPORACION  
EN ESCALA INDUSTRIAL, DE COMPUESTOS  
MINERALES A LAS PELICULAS PLASTICAS Y  
SELECCION DEL EQUIPO REQUERIDO.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO QUIMICO**  
**P R E S E N T A**  
**PATRICIA IRMA CALAHORRA FUERTES**  
**MEXICO, D.F. 1990**

**FALLA DE ORIGEN**



## **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 está 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.

# Contenido

<b>I. OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>.1</b>
<b>II. GENERALIDADES SOBRE PELICULAS PLASTICAS.</b> . . . .	<b>.4</b>
<b>2.1 HISTORIA.</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>2.2 DESCUBRIMIENTO DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD. PEBD.</b> . . . . .	<b>8</b>
2.2.1. PROPIEDADES. . . . .	11
2.2.2. USOS. . . . .	13
<b>2.3. POLIETILENO IRRADIADO.</b> . . . . .	<b>13</b>
<b>2.4 DESCUBRIMIENTO DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD. PEAD.</b> . . . . .	<b>14</b>
2.4.1. PROPIEDADES. . . . .	15
2.4.2. USOS. . . . .	16
<b>2.5 POLIETILENO LINEAL DE BAJA DENSIDAD. PELBD.</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>2.6 PROPIEDADES GENERALES DEL POLIETILENO.</b> . . . . .	<b>21</b>
2.6.1. USOS Y APLICACIONES . . . . .	25
<b>2.7 POLIPROPILENO. PP.</b> . . . . .	<b>28</b>
2.7.1 PROPIEDADES. . . . .	30
2.7.2 PELICULA MOLDEADA. . . . .	30
2.7.3 PELICULA ORIENTADA BIAIXIALMENTE. . . . .	30
2.7.4. USOS. . . . .	31
<b>2.8. POLI(METILPENTANO). TPX.</b> . . . . .	<b>31</b>

<b>2.9. COPOLIMEROS DE ETILENO/VINILACETATO. EVA. ....</b>	<b>32</b>
2.9.1. PROPIEDADES. ....	32
<b>2.10. POLI(1-BUTENO). ....</b>	<b>33</b>
2.10.1. PROPIEDADES. ....	33
2.10.2. USOS. ....	34
<b>2.11. VINILOS. ....</b>	<b>34</b>
2.11.1 CLORURO DE POLIVINILO. PVC. ....	34
2.11.1.1 PROPIEDADES. ....	36
2.11.1.1.1 NO PLASTIFICADO. ....	36
2.11.1.1.2 PLASTIFICADO. ....	36
2.11.1.2 USOS. ....	37
2.11.2 CLORURO DE POLIVINILIDENO PVDC. ....	37
2.11.2.1 PROPIEDADES. ....	38
2.11.3 COPOLIMEROS CLORURO DE VINILO/ACETATO DE VI- NILO. ....	38
2.11.4 ACETATO DE POLIVINILO. PVA. ....	38
2.11.5 ALCOHOL POLIVINILICO. ....	39
<b>2.12 IONOMEROS. ....</b>	<b>39</b>
2.12.1 PROPIEDADES. ....	41
<b>2.13 POLIMEROS Y COPOLIMEROS DEL ESTIRENO. ....</b>	<b>42</b>
2.13.1 POLIESTIRENO. ....	42
2.13.1.1 PROPIEDADES. ....	42
2.13.2 POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO. ....	43
2.13.2.1 PROPIEDADES. ....	43
2.13.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO. ....	44
2.13.3.1 PROPIEDADES. ....	44
2.13.4 COPOLIMERO DE ESTIRENO/ACRILONITRILO.SAN. ....	44
2.13.4.1 PROPIEDADES. ....	44
2.13.5 ACRILONITRILO/BUTADIENO/ESTIRENO.ABS. ....	44
2.13.5.1 PROPIEDADES. ....	45

**III. EFECTO DE LOS TITANATOS EN LA  
INCORPORACION DE AGENTES MINERALES A LOS  
COMPUESTOS ORGANICOS. . . . . 46**

**3.1 INTRODUCCION. . . . . 48**

**3.2. MEZCLADO. . . . . 56**

    3.2.1 UNIFORMIDAD TOTAL O GRADO DE MEZCLADO. . . . . 61

    3.2.2. TEXTURA. . . . . 64

    3.2.3. MEZCLA LAMINAR SIMPLE. . . . . 65

    3.2.4. MEZCLADO EN EXTRUSORES. . . . . 70

**3.3 CONCLUSIONES. . . . . 75**

**IV. EXPERIMENTOS DE LABORATORIO PARA  
DETERMINAR EL TITANATO MAS ADECUADO PARA LA  
INCORPORACION DEL MAYOR PORCENTAJE DE  
CARGAS MINERALES. . . . . 78**

**4.1 INTRODUCCION . . . . . 78**

**4.2 DESCRIPCION DE UN EXPERIMENTO MUESTRA DE UN  
TTANATO Y UNA RESINA POLIMERICA. . . . . 81**

    4.2.1 TITANATO ISOPROPIL TRIISOESTEARICO . . . . . 81

    4.2.2 ESTRUCTURA QUIMICA. . . . . 82

    4.2.3 PROPIEDADES FISICAS. . . . . 82

    4.2.4 MECANISMO. . . . . 82

    4.2.5 PROCESO. . . . . 82

**4.3 ANTECEDENTES TEORICOS. . . . . 83**

**4.4 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD CARGADO. . . . . 86**

**4.5 PELICULA SOPLADA DE PEBD CARGADO CON  $\text{CaCO}_3$ . . . . . 92**

<b>4.6 DISCUSION DE LOS RESULTADOS.</b> .....	<b>93</b>
<b>4.7 CONCLUSION.</b> .....	<b>94</b>
<b>4.8 DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE AGENTE DE UNION USADO.</b> .....	<b>94</b>
<b>4.8.1 CONCLUSION.</b> .....	<b>95</b>

<b>V. SELECCION DEL EQUIPO DE MEZCLADO PARA PRODUCIR PELICULAS DE POLIETILENO CON DISTINTAS CARGAS MINERALES, EMPLEANDO EL TITANATO ADECUADO.</b> .....	<b>96</b>
<b>5.1 EXTRUSION.</b> .....	<b>96</b>
<b>5.2 ELEMENTOS DE UN EXTRUSOR.</b> .....	<b>97</b>
<b>5.3 FUNCIONAMIENTO DEL EXTRUSOR.</b> .....	<b>101</b>
<b>5.4 DISEÑO DEL TORNILLO.</b> .....	<b>102</b>
5.4.1 EXTRUSORES CON MULTIPLES TORNILLOS. ....	105
5.4.2. MEZCLA DE COMPUESTOS. ....	105
5.4.3. RECUPERACION. ....	105
<b>5.5 EXTRUSION DE TUBERIA Y PERFILES.</b> .....	<b>106</b>
<b>5.6 EXTRUSION DE PELICULA.</b> .....	<b>108</b>
5.6.1. PELICULA PLANA. ....	107
5.6.2. PELICULA TUBULAR. ....	109
<b>5.7 LAMINACION.</b> .....	<b>110</b>
<b>5.8 EXTRUSORES PLASTIFICANTES.</b> .....	<b>111</b>
5.8.1. TRANSPORTE DE SOLIDOS. ....	113

<b>5.9. FUSION.</b> .....	<b>121</b>
5.9.1 CARACTERISTICAS DEL FUNCIONAMIENTO. ....	125
<b>5.10. DISEÑO DE TORNILLOS DE EXTRUSORES PARA LA EXTRUSION DE RECUBRIMIENTOS.</b> .....	<b>127</b>
<b>5.11. CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL TORNILLO.</b> .....	<b>129</b>
5.11.1. HISTORIAL DE CALCULO. ....	137
5.11.1.1. ESCALAMIENTO. ....	139
<b>5.12. CONCLUSIONES.</b> .....	<b>142</b>
<b>VI. PRUEBAS EN ESCALA INDUSTRIAL.</b> . . . . .	<b>143</b>
<b>6.1 CONCLUSIONES.</b> .....	<b>146</b>
<b>6.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.</b> .....	<b>146</b>
6.2.1 EXPERIMENTO Nº 1 . . . . .	149
6.2.2 EXPERIMENTO Nº 2 . . . . .	152
6.2.3 EXPERIMENTO Nº 3 . . . . .	155
6.2.4 EXPERIMENTO Nº 4 . . . . .	157
<b>VII. RESULTADOS.</b> . . . . .	<b>159</b>
<b>VIII.CONCLUSIONES.</b> . . . . .	<b>169</b>
<b>IX. BIBLIOGRAFIA</b> . . . . .	<b>172</b>

## I.OBJETIVOS

El objetivo directo de la tesis es definir las condiciones para incorporar, en escala industrial, compuestos minerales a las películas plásticas que se emplean como materiales de envase, con miras a adecuarlas a las necesidades de los mercados modernos, particularmente en el campo de envases flexibles. Se pretende también reducir los costos de fabricación y aumentar la vida del equipo.

En segundo término se seleccionará una parte del equipo industrial, refiriéndonos al equipo de mezclado y de extrusión.

El presente trabajo surgió como respuesta a una inquietud por disminuir, de alguna manera, el costo tan elevado que tiene la pigmentación de las películas de polietileno utilizadas para envasar detergente, las que se consumen en el país en grandes proporciones.

Existen en el mercado, principalmente, dos tipos de bolsas, la transparente y la pigmentada de blanco, siendo esta última generalmente más gruesa, lo que eleva su precio.

El grado de opacidad que presentan las películas es variable, ya que a mayor cantidad de pigmento la coloración blanca es mejor y el producto, por tanto, resulta más atractivo, sin embargo esto lógicamente aumenta el espesor y el costo.

Se realizó una encuesta con los productores de este tipo de película para conocer el método de pigmentación y se encontró que en el 100% de los casos se utiliza el dióxido de titanio ( $TiO_2$ ).



El dióxido de titanio que se adiciona, por ser un compuesto de naturaleza inorgánica no presenta reacción química con el polietileno, que es un compuesto orgánico y como consecuencia se presentan serios problemas, ya que el equipo donde se extruye la película sufre un desgaste prematuro, debido a la abrasión que experimenta por las partículas inorgánicas, lo que a la larga disminuye la vida útil del equipo, aumentando así el costo de producción ya que necesariamente debe ser reemplazado con mayor frecuencia, siendo un equipo excesivamente caro.

En la producción de la película blanca se lleva a cabo una operación primaria conocida como "Master Batch", que consiste en la incorporación de dióxido de titanio en proporción variable de entre un 30% y 40% sobre polietileno virgen. Posteriormente el "Master Batch" se adiciona al polietileno que se va a extruir en una proporción del 4% al 10% dando como resultado que la cantidad total real de dióxido de titanio en el producto final es, cuando mas, de tan solo un 5% aproximadamente.

Esta cantidad es sumamente pequeña, sin embargo no puede ser incrementada ya que conlleva fallas en la termosellabilidad del producto, que es una de las propiedades más importantes de la película de polietileno, y por consiguiente empobrecería el aspecto de la película y reduciría aún más la vida del equipo.

Debido a esto es que surgió la idea de buscar algún producto que permitiera una mayor incorporación de dióxido de titanio sin que repercutiese en fallas, principalmente, en las propiedades del producto. Debía ser un compuesto que sirviese como vehículo de liga entre la parte orgánica y la inorgánica de tal manera que hubiese una reacción química entre ambas partes, es decir la formación de un complejo.

Revisando en la literatura se encontró que los titanatos tienen gran facilidad para formar este tipo de complejos, por lo que se decidió trabajar con diferentes titanatos que se hallan a la venta en el mercado estadounidense.

Los resultados de diversas pruebas realizadas en planta piloto fueron satisfactorios, encontrándose que el titanato es adecuado para obtener mejores resultados al incorporar dióxido de titanio, y no solo este compuesto sino otros inorgánicos tales como carbonato de calcio, talco, meta-silicato de calcio, etc., que de igual manera contribuyen a la pigmentación de las películas, siendo más baratos que el dióxido de titanio.

Al realizar estas pruebas se observó que, contrariamente a lo que se esperaba, a mayor incorporación del agente mineral con el titanato adecuado, se obtenían mejores resultados en la pigmentación sin que aumentara el desgaste en el equipo e incluso disminuyó la potencia requerida por el motor del extrusor.

Después de un número determinado de pruebas, el desgaste en el equipo fue el mismo que si hubiese sido extruido exclusivamente el polietileno virgen, tanto en el perfil del tornillo extrusor, como en el cañón y en las boquillas del dado, sin verse afectado por el aumento de carga mineral, y la potencia utilizada por el motor disminuyó a 2/3 partes de la requerida en el proceso común.

Este es un factor importante en el costo de producción ya que generalmente los motores utilizados son de 200 HP, y consumen una cantidad considerable de energía, cuyo costo es elevado, por lo que si se logra reducir la potencia en 1/3 también se reducirán los gastos de ésta índole.

En los siguientes capítulos se expondrán los resultados obtenidos, el método seguido y las conclusiones que se pueden inferir sobre lo anteriormente dicho.

## II. GENERALIDADES SOBRE PELICULAS PLASTICAS.

### 2.1 Historia.

---

En 1828, F. Wöhler descubrió accidentalmente que una disolución acuosa de cianato amónico evaporada a sequedad, producía un residuo de urea, sustancia orgánica producto final del metabolismo de albuminoides, que es eliminada por la orina en el hombre y muchos animales. Antes del año 1828, muchos científicos opinaban que era imposible sintetizar en el laboratorio cualquier sustancia elaborada por un ser vivo, pues se suponía que las materias orgánicas se generaban bajo la acción de la llamada FUERZA VITAL y que las fuerzas corrientes que gobernaban las reacciones entre sustancias inorgánicas, no jugaban papel alguno entre los seres vivientes.

La experiencia de Wöhler marca el inicio de la química orgánica moderna, pues una vez abandonada la vieja teoría de la FUERZA VITAL, los científicos se lanzaron al estudio y síntesis de compuestos orgánicos de creciente complejidad.

En nuestro planeta, los seres vivos están formados en su gran mayoría por sustancias en las que predominan dos elementos el carbono y el hidrógeno, aunque también pueden estar presentes otros, como el oxígeno, nitrógeno y fósforo.

El átomo de carbono por su tetravalencia y capacidad de formar enlaces simples y múltiples con otros átomos idénticos, es el eslabón idóneo para formar largas cadenas o anillos. Esto posibilita la síntesis de moléculas muy complejas que resultan necesarias en muchos procesos vitales .

Una gran parte de los compuestos y materias primas necesarias en procesos de fabricación, procede del petróleo, mezcla compleja de productos orgánicos que procede de transformaciones diversas sufridas por sustancias de origen animal y vegetal, bajo elevadas presiones y altas temperaturas.

Las materias primas de la industria química procedentes de los crudos petrolíferos, se obtienen mediante el proceso de la destilación fraccionada, en el que se separan desde fracciones ligeras (éter de petróleo, gasolina) hasta las pesadas (aceites lubricantes, alquitranes) al ir aumentando paulatinamente la temperatura del crudo, con lo que van destilando fracciones de punto de ebullición progresivamente más elevado.

Mediante estos productos simples se pueden obtener cuerpos de moléculas más complejos, que a su vez pueden ser punto de partida de nuevas síntesis en una serie sucesiva de transformaciones.

Todas las fibras, naturales o sintéticas, están constituidas por moléculas de cadena larga, lo que hace posible, mediante procesos de hilatura, obtener hebras de gran longitud y resistencia mecánica. Las cadenas de estas moléculas se forman por asociación de otras más simples, dando lugar a los compuestos llamados polímeros.

El término POLIMÉRICO aparece por primera vez en la literatura química en el año 1871 y es propuesto por H. Hlasiewicz y J. Habermann para algunas sustancias naturales de peso molecular elevado como las proteínas y la celulosa.

En el campo de los envases flexibles las películas plásticas o poliméricas cobran una gran importancia. Se le denomina película a una hoja plana cuyo espesor es menor de 250 micras y el nombre de hoja lo llevan las mayores de 250 micras.

La palabra película proviene del latín PÉLLICULA, que significa piel delgada y delicada.

Aún cuando la primera película plástica que se produjo comercialmente fue el nitrato de celulosa, debido a la inflamabilidad que presenta no tuvo aplicaciones importantes en el campo de los envases flexibles.

La cualidad esencial que distingue a los plásticos es su amplio campo de utilización, ya que han sustituido en sus aplicaciones no sólo al caucho, sino también a muchos otros productos. Poseen individualmente propiedades muy distintas, sin embargo tienen un conjunto de características comunes que nos permiten definirlos como grupo.

En primer lugar los plásticos son compuestos artificialmente sintetizados por el hombre que en ningún caso se encuentran en la naturaleza. En segundo lugar, desde el punto de vista químico, todos ellos son polímeros orgánicos. Por último pueden fundirse sin descomponerse, y en forma líquida admiten ser trabajados según diversas técnicas, mediante las que se producen objetos de formas variadísimas.

Sobre la base de estas propiedades, los plásticos presentan una gran diversidad de formas y propiedades que dependen de la estructura molecular. El conocimiento de dicha estructura ha sido un punto de partida crucial y es por ésto que la historia de los plásticos es un claro ejemplo, uno de los más importantes del "trabajo de la ciencia al servicio de la tecnología", característica distintiva del progreso industrial del siglo XX.

Se puede decir que la edad de los plásticos se inició con la investigación sobre las propiedades de ciertas moléculas orgánicas. En la década de los años treinta W. Carothers investigador al servicio de E.I. Dupont the Nemours and Co. en Willmington, E.U.A., estudiaba el comportamiento de ciertas cadenas de gran número de eslabones en sustancias naturales utilizadas en perfumería, tales como la civetona y muscona. En el curso de sus trabajos y para confirmar las estructuras moleculares propuestas, Carothers trató de sintetizar compuestos basados en esas grandes estructuras cíclicas, a partir de moléculas de cadena larga, preparadas a la medida en el laboratorio.

Desde el punto de vista del resultado previsto, la operación no fue precisamente un éxito, ya que las cadenas mostraban poca tendencia a cerrarse formando anillos, pero en cambio se vió que las moléculas tenían tendencia a soldarse entre sí, dando lugar a otras mucho más largas. Tales macromoléculas se conocen hoy en día con el nombre de polímeros, y se componen de centenares de unidades submoleculares repetidas (monómeros). Carothers sabía que las fibras naturales tales como la seda y el algodón debían sus propiedades peculiares a su estructura de polímeros de cadena larga y llegó a la conclusión de que accidentalmente había descubierto el procedimiento de síntesis de una fibra artificial.

Dentro de la familia de las poliolefinas los miembros más nuevos y más atractivos son las poliolefinas estereoregulares, el primer miembro (polietileno de alta presión) no es un polímero estereoregular, sin embargo el primer polímero estereoregular sintético (polivinil isobutil éter) no es una poliolefina.

Se puede decir que la ciencia de los polímeros comenzó en los años veinte con el trabajo de Svedburg en la ultracentrífuga y con la teoría de H. Staudinger de que los polímeros consisten en una gigantesca y larga cadena de moléculas y que no son agregados coloidales. Después de una década, la idea básica de Staudinger fue gradualmente aceptada y un nuevo progreso empezó a ser posible.

Un importante avance fue el reconocer que la cohesión en los polímeros de alto peso molecular depende principalmente de cómo estén enredadas las largas cadenas y que la fuerza y dureza adicionales son ganadas a través de cualquiera de los siguientes tres mecanismos:

1. Atracciones de van der Waals entre grupos polares.
2. Formación de un campo cristalino entre cadenas bien acopladas.
3. El entrecruzamiento químico de los enlaces. (1).

Las poliolefinas forman una clase importante de termoplásticos desde cualquier punto de vista, pero son particularmente importantes como precursores de las películas, ya que incluyen polietileno de alta y baja densidad y polipropileno. La película de polietileno de baja densidad (PEBD) constituye la mayor parte del total de películas en el mercado, sin embargo el polietileno de alta densidad (PEAD) y el polipropileno (PP) no están muy por debajo de él.

## **2.2 DESCUBRIMIENTO DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD. PEBD.**

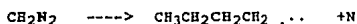
---

Podemos imaginar la química de los polímeros de los años cincuenta, cuando la baquelita era bien conocida pero el poliestireno y el cloruro de polivinilo (PVC) eran novedades creadas con el propósito de diseñar y sintetizar un plástico nuevo, útil, versátil y barato.

En primer lugar para lograr estos atributos, el polímero debía tener un peso molecular suficientemente alto para que pudiera haber la formación de largas cadenas (pero no tan alto que dificultase el proceso). En segundo término la fuerza y dureza debían ser adicionadas, pero no introduciendo grupos polares (ya que estos aumentarían el peso, volumen y costo y perjudicarían la estabilidad térmica) tampoco introduciendo enlaces químicos cruzados (ya que requerían ciclos específicos, probablemente introducirían color y producirían desechos no reciclables) sino con la formación de campos cristalinos. Las ventajas que esto presenta son que no se necesitan aditivos, no se tienen problemas de color, tiene una gama de mezclado/moldeo relativamente

definida, moldeo rápido y reversible por calentamiento y enfriamiento y ningún costo extra. Las propiedades pueden variar considerablemente variando el tamaño y número de campos cristalinos, controlándolo mediante el grado, regularidad y acoplamiento entre las cadenas adyacentes.

Habiendo eliminado los sustituyentes polares, se llegó a la conclusión de que la composición lógica la daría un hidrocarburo polimérico. Las cadenas debían ser lisas y bien acopladas para alcanzar la cristalización, ya que si no las fuerzas de atracción entre las cadenas serían muy débiles. La cadena más lisa podría ser aquella con grupos metileno. Consultando la literatura los químicos encontraron alicientes en el hecho de que las cadenas rectas de parafinas se vuelven sólidos cristalinos tan pronto como el largo de la cadena excede el número de diez carbonos y notaron que el polietileno de hecho había sido sintetizado en el siglo anterior por Von Pechmann y colaboradores (2) mediante la descomposición de diazometano.



Con estos alicientes se buscó una meta económicamente factible para obtener dicho polímero, y se llegó a que el etileno era el monómero más práctico. Ahora el problema era hacer que la molécula de etileno polimerizara dando un producto de alto peso molecular. Lógicamente se elevaron temperaturas y presiones para formar la reacción en la dirección deseada.

En realidad para la primera obtención de poliolefinas hay que empezar por darle crédito a la decisión de Imperial Chemical Industries Ltd., (ICI) por explorar las fronteras de las reacciones ultrapresurizadas, que fueron iniciadas por Bridgeman en Estados Unidos y por Michels en Holanda. El primer polímero de alto peso molecular de etileno fue producido por ICI en 1933 durante un programa de investigación sobre el efecto de presiones extremadamente altas en reacciones en cadena. Entre las 50 reacciones que fueron realizadas por el grupo de investigación de ICI sin obtener éxito se encontraba la alquilación de benzaldehído con etileno, seguida por Sir Robert



Robinson (1) e intentada por R. O. Gibson en Marzo de 1933. La reacción intentada no resultó pero una traza de polímero de etileno fue formada gracias (como se descubrió posteriormente) a la fortuita presencia de peróxido en el benzaldehído.

Una falla en la presión, ocurrida durante la repetición del experimento utilizando etileno solo, provocó que se tuviera que adicionar etileno fresco para restaurar la presión a su valor original. Al final del experimento se obtuvieron aproximadamente 8 g. de un polvo blanco sólido que fue identificado como polietileno. Lo que sucedió fue que el etileno adicionado contenía la cantidad exacta de oxígeno, necesaria para iniciar la polimerización.

Como se ha visto las circunstancias fortuitas jugaron un papel muy importante en estos descubrimientos, sin embargo no hay que restarle importancia a Fawcett, Gibson, Swallow y otros de ICI (3) por el lanzamiento de sus investigaciones y por haber reconocido el significado de tan inesperados resultados, y también por aprovechar la ventaja y llegar a una conclusión exitosa.

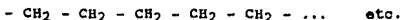
El PEBD fue utilizado inicialmente en la industria eléctrica, particularmente como material aislante para cables bajo el agua y posteriormente para radar, con lo que ayudó a la Gran Bretaña en la Segunda Guerra Mundial.

El desarrollo de la película de PEBD ocurrió durante la Segunda Guerra Mundial mediante el método de calandrado de una mezcla de polietileno/polioisobuteno y luego, en 1946, por extrusión.

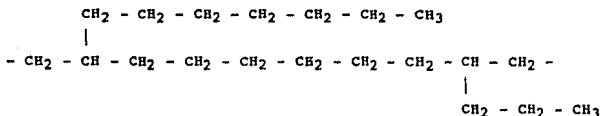
La polimerización de etileno puede ocurrir en un amplio rango de presiones y temperaturas, pero el proceso comercial de alta presión utiliza presiones entre 1000 y 3000 atmósferas y temperaturas entre 100 y 300° C. A mayor temperatura el polietileno se degrada. El primer iniciador fue el oxígeno, sin embargo se utilizan hoy en día otros iniciadores.

Se utilizan dos tipos de reactores, llamados autoclave y tubular.

La estructura más simple para la molécula de polietileno es una cadena totalmente libre de ramificaciones, de unidades de  $-CH_2-$  :



Sin embargo la naturaleza del proceso de alta presión, permite que se formen ramificaciones en la cadena lo que proporciona las propiedades del PEBD. Se producen ramificaciones tanto largas como cortas:



Se debe observar que cada ramificación contiene un grupo metilo terminal ( $-CH_3$ ). Una manera de caracterizar la ramificación es el número de grupos metilo en 100 átomos de carbono.

### 2.2.1. PROPIEDADES.

La estructura de la molécula de PEBD también afecta otras propiedades y no solo a la densidad. La gran longitud de las cadenas de polímero significan que una cierta cantidad de enmarañamiento ocurrirá normalmente y esto impedirá la completa cristalización en el enfriamiento y aparecerán áreas desordenadas entre los cristalitas.

El PEBD es un material correoso, ligeramente translúcido y es ceroso al tacto. La densidad puede variar entre aproximadamente  $0.916 \text{ g/cm}^3$  a  $0.935 \text{ g/cm}^3$ . Puede ser extruído por soplado en película tubular o extruído a través de un dado y moldeado. El moldeado en frío da una película más clara, sin embargo la película soplada puede

ser producida con buena claridad si se implementa un enfriamiento en la burbuja. La película de PEBD tiene un buen balance de propiedades tales como la resistencia a la tensión, resistencia a la ruptura, resistencia al impacto y resistencia al desgarre. También retiene sus propiedades a temperaturas muy bajas (cerca de los  $-60^{\circ}\text{C}$  a  $-70^{\circ}\text{C}$ ). Es una buena barrera contra el agua y el vapor de agua, pero no es tan buena barrera con los gases. No es recomendable, por lo tanto, como envase de productos susceptibles a oxidación.

Presenta excelente resistencia química, particularmente a los ácidos, álcalis y soluciones inorgánicas. Es, sin embargo, sensible a hidrocarburos, hidrocarburos halogenados y a los aceites y grasas. El efecto que presenta es la absorción seguida de una hinchazón. La hinchazón es menor para polietileno de alto peso molecular. Algunas sustancias químicas polares pueden causar ruptura por esfuerzo en PEBD. Los agentes típicos que causan esta ruptura son detergentes, algunos aceites esenciales, aceites vegetales, benzaldehído y nitrobenzeno. Sin embargo estos productos normalmente no atacan o disuelven el polietileno, pero en presencia del esfuerzo causan rupturas superficiales y aun la completa ruptura del material. Este problema se soluciona utilizando polietileno de alto peso molecular.

Adicionando algunos aditivos adecuados es posible producir película de PEBD con bajo coeficiente de fricción y baja tendencia a formar "bloques".

La película es inodora e insípida, es por esto que es ampliamente usada en el envase de productos alimenticios. Una desventaja de la película de PEBD es su punto de reblandecimiento relativamente bajo, lo que impide una esterilización por vapor.

La película de PEBD es fácilmente sellada por calor y proporciona una buena soldadura. Es difícil sellarla con adhesivos ya que presenta baja absorción y el uso de agua o solventes en adhesivos es restringida.

Los adhesivos del tipo "Hot Melt" pueden ser utilizados pero son caros y solo presentan una pequeña ventaja sobre el sellado directo por calor.

Es posible imprimir la película de PEBD mediante variados métodos, siempre y cuando la superficie haya sido tratada con anterioridad. Este pretratamiento es necesario ya que la naturaleza de la superficie de la película es inerte y no polar y esto dificulta la impresión.

El PEBD también tiene excelente estabilidad dimensional con respecto a los cambios en la humedad del ambiente.

### **2.2.2. USOS.**

El alto tonelaje utilizado de película de PEBD es un buen indicador del gran número de aplicaciones que se han desarrollado sobre este material. La mayor parte se utiliza en los campos de envase, construcción, horticultura y agricultura.

## **2.3. POLIETILENO IRRADIADO.**

---

El polietileno irradiado se produce pasando una película de PEBD ordinario continuamente a través de un campo de alta energía de electrón. Esto lo convierte en una película no fundible, la cual, con los estabilizadores apropiados resistirá temperaturas de 105° C por largos periodos, o de 230° C durante cortas exposiciones.

El proceso reduce ligeramente la transmisión de gas y agua y la película tiene buena claridad. La fuerza de ruptura es buena. Se utiliza para envoltura en caliente debido a su encogimiento, particularmente en carne fresca.



Posteriormente, según Ziegler, fue un trabajo sistemático a través de la tabla periódica hasta encontrar un diferente inhibidor que diese el efecto opuesto: suprimir el desplazamiento erróneo de la reacción y favorecer la continuación del crecimiento de la cadena y la producción de polímeros de alto peso molecular. El mejor "inhibidor" probado fue el titanio y fue entonces cuando nació el sistema catalítico Ziegler (cloruro de titanio y álcali de aluminio) y el polietileno Ziegler (5).

El primer polímero crudo de Ziegler tenía propiedades distintivas, superiores a las del ya conocido polietileno de alta presión.

Al mismo tiempo otro grupo en la Standard Oil, estaba investigando el mismo principio catalítico, cobalto en carbón vegetal, para una reacción diferente. Su trabajo condujo a otro descubrimiento accidental de polietileno lineal (6).

Cuando Ziegler intentaba utilizar el catalizador de cobalto para la alquilación con etileno, encontró que un polímero considerablemente sólido se formaba. Otros metales y otros soportes fueron utilizados por Ziegler y sus colaboradores y esto los condujo a probar el molibdeno en alúmina que forma las bases para el desarrollo del proceso práctico para la obtención del polietileno de baja densidad.

Estos dos procesos competitivos, descubiertos en forma independiente cada uno y el de Ziegler, fueron desarrollados por Phillips y en menor forma por Standard Oil. El proceso de Phillips es ahora el líder en el mundo para la producción de polietileno lineal.

#### **2.4.1. PROPIEDADES.**

La estructura lineal que presenta el PEBD es aproximadamente la misma que los polietilenos producidos por el proceso de baja presión. Algunas ramificaciones se forman en la cadena pero son cortas y escasas. Copolímeros del etileno con, por ejemplo, 1-buteno, se producen también por el proceso de baja presión. La densidad

de los copolímeros es de alrededor de  $0.945 - 0.95 \text{ g/cm}^3$  siéndo que la de los homopolímeros lineales es de alrededor de  $10.96 \text{ g/cm}^3$ .

La película de PEAD es más tiesa, más dura y tiene menos tacto ceroso que la de PEBD. Puede ser producida por extrusión por soplado o extrusión con dado, pero por soplado se obtiene una película más translúcida.

El punto de reblandecimiento del PEAD es más alto ( $121^\circ \text{ C}$ ) y es por esto que puede ser esterilizado mediante vapor. La resistencia a bajas temperaturas es similar a la del PEBD, al igual que la resistencia a la ruptura, pero la resistencia al impacto y al desgarre son menores. Debido a su naturaleza lineal, las moléculas de PEAD tienden a alinearse en la dirección del flujo y la resistencia al desgarre es mucho menor en la dirección del equipo.

La permeabilidad del PEAD es menor que la del PEBD en un factor de 5 a 6 veces, sus propiedades de barrera para vapor húmedo son buenas. De hecho, de las películas que sirven como barrera a la humedad solamente la superan las de copolímeros de cloruro de vinil / cloruro de viniliden.

La resistencia química del PEAD es superior a la del PEBD y particularmente presenta mayor resistencia a los aceites y grasas. La solubilidad en solventes orgánicos se reduce al aumentar la densidad.

El PEAD está sujeto a ruptura por esfuerzo de tipo ambiental al igual que el PEBD, pero de igual manera el efecto se reduce utilizando polímeros de alto peso molecular.

#### **2.4.2. USOS.**

Al igual que con el PEBD las aplicaciones del PEAD cubren amplios campos en los envases, películas de fibras y papeles sintéticos.

## **2.5 POLIETILENO LINEAL DE BAJA DENSIDAD. PELBD.**

Después de estos descubrimientos se pensó que la meta que valía la pena ahora alcanzar era el desarrollo de un producto que combinara las características del PEBD y la linealidad del de alta densidad, o por lo menos uno que tuviera las propiedades intermedias entre los dos extremos. Una aproximación lógica era intentar emplear el catalizador tipo Ziegler, o bien el Phillips, en el proceso del polietileno de alta presión para convertirlo de radicales libres a iniciadores iónicos. Un cambio en el tipo y cantidad de ramificaciones en la cadena del polímero era el resultado que se esperaba.

La compañía Union Carbide fue la primera en presentar en los Estados Unidos (en 1977) un polietileno lineal de baja densidad (presentaron tanto el producto como el proceso). También en Canadá, la compañía Du Pont había obtenido productos similares por esas fechas. Un proceso competitivo con el de Union Carbide fue presentado poco después por la compañía Dow Chemical.

La Tabla II.1 muestra las condiciones de varios procesos de producción de polietileno lineal de baja densidad en el mundo.



TIPO DE PROCESO	STATUS	COMPAÑIA QUE LO DEBARROLLA	PRE-SION lb/in <sup>2</sup>	CATALI-ZA-DOR(a)
Fase gaseosa lecho fluidizado	Comercial	Union Carbide	300	Cr
	Planta Piloto	Naphtachimie	350	Z
Fase gaseosa lecho agitado	Planta Piloto	Amoco	300	Z
	Planta Piloto	Citiles Services	300	Z
Fase líquida	Comercial	Phillips	450	Cr
	Planta Piloto	Solvay	400	Z
Fase líquida solución	Comercial	DuPont Canadá	400-600	Z
	Comercial	Dow	400-600	Z
	Comercial	Mitsui Petrochemical	600	Z
	Planta Piloto	DSM	600	Z
Alta presión	Comercial	CdF	20,000	Z
(a) Z = Tipo Ziegler Cr = Tipo Cromo				

**TABLA II.1 Condiciones de producción de diversos procesos para la obtención de PELBD. (8).**

Las diferentes compañías que producen polietileno en los Estados Unidos aparecen en la Tabla II.2.

PRODUCTOR	CAPACIDAD DE POLIOLEFINAS (MILES DE TONELADAS METRICAS/AÑO)				TOTAL
	PEBD	PEAD	PELBD	POLIPROPILENO	
Allied	-	320	-	-	320
American Hoechst	-	110	-	-	110
Amoco (Std. of Ind.)	-	160	-	230	390
ARCO (Atlantic Richfield)	-	155	-	180	335
Chemplex	190	130	-	-	320
Dow	440	170	315a	-	925
DuPont	320	405	-	-	725
El Paso	170	-	15b	150	335
Exxon	265	-	270a	180	715
Gulf	410	260	-	180	850
Himont	-	15	-	590	605
Mobil	225	-	170a	-	395
Natl. Petrochemicals	-	-	250a	-	250
Northern Petrochemicals	255	-	295a	100	550
Phillips	-	625	-	100	725
Shell	-	-	-	350	350
Soitex	-	340	-	90	430
Texas Eastman	180	-	100b	65	345
Union Carbide	180	-	610a	-	790
USI	330	-	-	-	330
USS Chemicals	-	-	-	235	235
TOTAL	2,965	2,690	1,925	2,450	10,030
a. La planta puede producir también PEBD.					
b. La planta puede producir también PEAD.					

**TABLA II.2 Productores de los Estados Unidos de Poliolefinas y sus Capacidades. (9).**

Una característica impresionante en el desarrollo del PELBD es que, a pesar de que el proceso Phillips desplazó al proceso Ziegler para polietileno de alta densidad en muchos países, la mayoría de las nuevas plantas (o de las viejas reacondicionadas) para producción de PELBD usarán el catalizador tipo Ziegler.

Las diferencias citadas en la Tabla II.3 se atribuyen principalmente a las diferencias entre el grado y tipo de ramificaciones en las cadenas poliméricas. Se ha reportado que el PELBD tiene menos pero más largas ramificaciones que el PEBD.

PROPIEDAD	PELBD vs. PEBD	PELBD vs. PEAD
Fuerza de tensión	mayor	menor
Elongación	mayor	mayor
Fuerza de Impacto	mayor	similar
Resistencia al calor	mayor	menor
Torsura	mayor	menor
Procesamiento	más difícil	más sencillo
Opacidad	peor	mejor
Brillo	peor	mejor
Claridad	peor	mejor
Fuerza de fusión	más baja	más baja
Rango de fusión	más estrecho	más estrecho

**TABLA II.3 Diferencias entre los polietilenos lineal de baja densidad, baja densidad y alta densidad. (8,10).**

Gran parte del crecimiento en la demanda del PELBD ha sido y será a expensas de otras poliolefinas, especialmente del PEBD convencional. Se dice que el PELBD puede reemplazar al PEBD en un 70 u 80% de los casos. Otro signo acerca de que los

tiempos han cambiado es el hecho de que ICI, creador del proceso de PEBD, ha cesado su producción.

## **2.6 PROPIEDADES GENERALES DEL POLIETILENO.**

Con respecto a las propiedades del polietileno, las técnicas más empleadas para conocer su peso molecular y la distribución de los pesos moleculares, son la osmometría, la ebullición y la crioscopia, observándose que el polietileno presenta una distribución de pesos moleculares muy amplia.

La estructura puede ser descrita en función de tres factores:

- a) Distribución del peso molecular.
- b) Heterogeneidades estructurales que pueden darse en la cadena, como ramificaciones.
- c) Distribución de ramificaciones en una cadena dada.

La cristalinidad que presenta el polietileno está en función del número de ramificaciones que hay en la cadena, es decir, a mayor número de ramificaciones la cristalinidad disminuye.

El polietileno no se vuelve un material amorfo ya que presenta altos grados de entrecruzamiento.

El polietileno es resistente al agua y a soluciones acuosas diluidas por lo que no hay cambios en sus propiedades de aislante eléctrico y otras cualidades físicas en atmósfera de gran humedad o inmersión. Sin embargo los ácidos sulfúrico y nítrico concentrados así como otros agentes de oxidación atacan lentamente al plástico.

En general el polietileno resiste a los solventes comunes abajo de los 60° C. A temperatura superior a 70° C es atacado por hidrocarburos alifáticos, aromáticos y clorados. Al incrementar más la temperatura puede llegar a disolverse.

La densidad y el peso molecular influyen en relación al ataque de los hidrocarburos.

El polietileno sufrirá fallas por esfuerzos recibidos los cuales se manifiestan como estrellamientos externos o internos y son originados por causas ambientales, térmicas, fatiga, solventes u oxidativas.

El llamado estrellamiento ambiental está caracterizado por fracturas de apariencia vidriosa. Este tipo de fallas se encontraron por primera vez en alambre y cable, posteriormente en botellas de polietileno. Esta tendencia puede reducirse seleccionando adecuadamente el polímero y realizando procedimientos adecuados de moldeo. Otro método para la reducción del este tipo de falla ha sido agregando aditivos como poli-isobuteno, hule butílico y utilizando un monómero del tipo del acetato de vinilo.

El estrellamiento por causas térmicas se debe principalmente a una debilidad originada en la alta densidad del producto, lo que se ha logrado corregir aumentando el índice de fusión, es decir, incrementando la velocidad de extrusión del material y disminuyendo su viscosidad.

Una alteración química del producto puede estar comprendida en dos fallas. La primera es porque se lleva a cabo una etapa oxidativa irreversible que no se remedia al volver a moldear la pieza. Esto puede deberse a residuos de catalizadores en el plástico o a ciertos tipos de aditivos.

El tener estabilizadores de calor es benéfico para este tipo de fractura.

La textura cristalina del polietileno tiene influencia marcada en el cambio que sufre el material, que va desde ser frágil hasta convertirse en dúctil. Al someterse a cambios drásticos de temperatura, éste será más frágil.

La transparencia del polietileno disminuye al aumentar la linealidad y su cristalinidad.

Al disminuir la densidad disminuye la fragilidad, por lo tanto un cambio pequeño en su densidad tendrá repercusiones importantes en las propiedades de impacto.

El polietileno muestra baja adhesión, es decir, una reducida tendencia a pegarse a una superficie.

El llamado "bloqueo" se refiere a la adhesión entre capas de película o placas del material que no pueden separarse, que es un fenómeno observado en el polietileno. Para evitar esto se utilizan oleamidas.

La temperatura de encendido o "flash" del polietileno es de 340° C y la de autoignición es de 349° C. La temperatura a la que una nube de polietileno se quema es de 450° C.

Las propiedades aislantes del polietileno se pueden comparar con las de cualquier otro material aislante eléctrico. Sus características varían ligeramente con la densidad y su peso molecular.

El polietileno sufre interacciones con diversos materiales, las que incluyen el envejecimiento, irradiación y degradación.

Por envejecimiento se entiende una serie de reacciones entre las que están el rompimiento y modificación de las cadenas, que ocurren al exponer el plástico a

diversos reactivos químicos o a las condiciones ambientales, lo que trae como consecuencia que la degradación del polietileno en aire (oxígeno) que generalmente es lenta, se vea acelerada por la acción del calor, radiación ultravioleta o de alta energía.

La decoloración y estrellamiento son síntomas de envejecimiento.

La irradiación surge de una serie de fuentes de radiaciones como son las ultravioletas, infrarrojas, etc., en interacción con el plástico. Lo que se presenta es una tendencia a la ramificación mas que a la degradación. Como hay desprendimiento de gases, al aparecer hidrógeno se origina una pérdida de peso del polímero y, por el contrario, puede llegar a incorporarse oxígeno del aire y por lo tanto ganará peso.

Con la radiación aumentará su transparencia, su manejabilidad, soportará mayores fuerzas tensoras y mejorará la resistencia al estrellamiento.

La degradación básicamente se debe al efecto de agentes como la luz, radiaciones ultravioleta y el calor, aunque también se presentan ataques por bacterias, hongos, animales marinos y roedores, siendo el polietileno el plástico más resistente a este tipo de ataques.

Estas son en una manera muy general las propiedades que caracterizan al polietileno.

PROPIEDAD	PEBD	PEAD	PELBD	PP
Gravedad específica (gr./cm <sup>3</sup> )	0.92	0.96	0.93	0.90
Módulo de elasticidad (tens) (10E5 lb/in <sup>2</sup> )	0.20	1.0	NA	1.50
Fuerza de tensión (lb/in <sup>2</sup> )	1,500	4,000	3,000	5,000
Fuerza al impacto (ft-lb/in)	muy alto	2.0	7.0	1.0
Temp. de ablandamiento (°C)	100	120	110	150
Temp. máx. de servicio (°C)	80-90	110-120	90-105	130-140
Temp. de quebrantamiento (°C)	muy baja	-90	-100	-10
Resistencia eléctrica (ohm-cm)	10-10	10-10	NA	10-10
Tiempo de rompimiento al stress	21 días	3 min.	24 hrs.	alto
Claridad	Translúcido	Semiotopaco	Translúcido a lúcido transparente	Translúcido a transparente

(a) Orientada o nucleada

**TABLA II.4 PROPIEDADES DE LAS POLIOLEFINAS**

### 2.6.1. USOS Y APLICACIONES.

La gama de aplicaciones y usos que presenta el polietileno es amplísima y comprende, entre otras, la de productos utilizados en las industrias de empaque, aparatos domésticos, industriales, de la construcción, comunicaciones, alimenticia, médica, etc.

El incremento en las aplicaciones del polietileno se debe en gran medida a que es fácil de fabricar con equipo convencional de procesamiento de plásticos, teniendo un amplio rango de propiedades y bajo costo.

En Europa se le dió una aplicación importante al usar cartulina recubierta con polietileno, donde este actúa como barrera contra la humedad y también sirve para



sellar el empaque. Este tipo de empaque es mejor conocido con el nombre de "Tetra-Pak".

Como material de envase, otra aplicación resulta en el campo del empaque especializado, en condiciones consideradas extremas en su manejo como las bolsas protectoras de la humedad y productos alimenticios perecederos.

En agricultura se usa para preservar pastos y sembradíos, en la construcción de invernaderos y en algunos casos como recipientes para abonos artificiales en terrenos desérticos.

En cuanto a la industria de la construcción se aprovecha su permeabilidad reducida para disminuir la transmisión de humedad en pisos y protección del material de construcción.

Es útil como revestimiento de canales para evitar la filtración, líneas para riego por goteo y en depósitos para retener el agua.

Se aplica también en juguetes, automóviles, aparatos eléctricos, etc. Nosotros podemos encontrar poliolefinas en nuestra vida diaria, ya sea en forma de fibras (alfombras internas y externas, tapicería, ropa interior), películas (envases), envases flexibles (botes y bolsas para detergentes), artículos moldeados por inyección (enseres domésticos, autopartes, juguetes) y extrudidos (aislantes para llantas, tuberías).

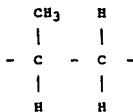
## **2.7 POLIPROPILENO. PP.**

Los primeros intentos para polimerizar el propileno dieron como resultado líquidos aceitosos o sólidos elásticos sin ningún valor comercial. Posteriormente el trabajo del profesor Natta, en Italia, fue usar catalizadores del tipo Ziegler. Encontró

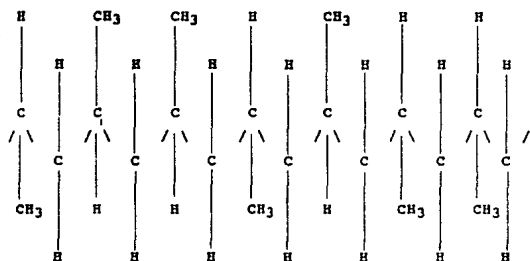
que si en el sistema catalítico Ziegler se reemplazaba el tetracloruro de titanio por tricloruro de titanio, se formaba un catalizador estereoespecífico que permitía la formación de polímeros de propileno de alto peso molecular.

La polimerización de Natta es básicamente igual al proceso Ziegler para la formación de PEAD.

La unidad básica estructural del polipropileno es:

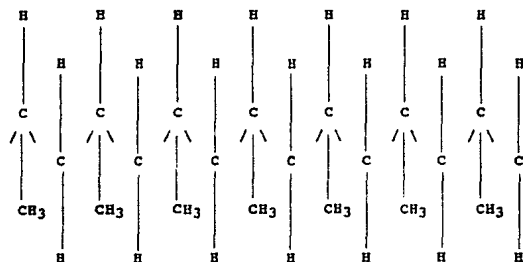


y es similar a la del polietileno con grupos metilo sustituidos por uno de los átomos de hidrógeno. La polimerización de propileno sin adicionar catalizadores estereoespecíficos produce eslabonamientos accidentales que dan como resultado un polímero aceitoso o elástico que es conocido como la estructura **ATACTICA** con una distribución desordenada de los grupos metilo en cada lado de la cadena como se muestra en la siguiente figura (2.1)



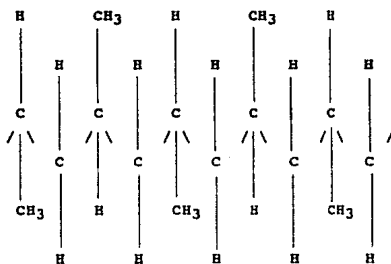
**FIG. II.1 Polipropileno atáctico.**

El polímero regular cristalino formado por catalizadores estereoespecíficos se conoce como **ISOTACTICO**, los grupos metilo están situados siempre a lo largo del mismo lado de la cadena del polímero. De hecho, los átomos de carbono se arreglan dentro de la cadena helicoidal, con los grupos metilo hacia afuera.

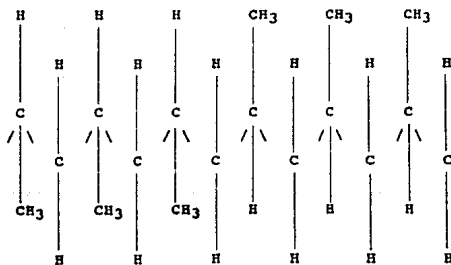


**FIG. II.2 Polipropileno isotáctico.**

Existen 2 formas más de polímeros, la SINDIOTACTICA y el ESTEREOBLOQUE:  
 QUE:



**FIG. II.3 Polipropileno sindiotáctico.**



**FIG. II.4 Polipropileno estereobloque.**

### **2.7.1 PROPIEDADES.**

El polipropileno tiene menor densidad que el PEBD ( $0.90 \text{ g/cm}^3$ ), es más duro y tiene un punto de reblandecimiento más alto. La película de PP puede ser hecha tanto por extrusión por soplado, como por extrusión por dado. Comercialmente las películas de PP que más interesan son las extrudidas mediante dado y moldeadas, que no presentan orientación, las orientadas biaxialmente con más o menos igual orientación en sentido del equipo y transversalmente y las películas orientadas biaxialmente con orientación balanceada. También es posible producir PP orientado uniaxialmente pero este se utiliza en la manufactura de fibras.

### **2.7.2 PELICULA MOLDEADA.**

La película moldeada de PP tiene buena transparencia y brillo, pero al incrementar el espesor se dificulta el enfriamiento y esto ocasiona que se inhiba el crecimiento de espirulitas más largas, lo que causa falta de claridad.

La resistencia a la tensión del PP moldeado es aproximadamente dos veces la del PEBD moldeado, pero la resistencia al desgarre es solo la mitad. Una limitación de la película moldeada de PP es la baja resistencia al impacto a bajas temperaturas (poco menos de  $0^\circ \text{C}$  aproximadamente).

La permeabilidad es ligeramente mayor que la del PEAD pero mucho más baja que la del PEBD. La resistencia química es buena, en particular, es más resistente a los aceites y grasas. El PP no está sujeto a ruptura por presión (stress) ambiental.

### **2.7.3 PELICULA ORIENTADA BIAXIALMENTE.**

Debido a la amplia variación posible en la orientación en las dos direcciones, es obvio que es posible un amplio rango de propiedades. La película balanceada tiene una resistencia a la tensión, en cada dirección, casi 4 veces la que presenta la película

de PP moldeada. La orientación biaxial mejora ligeramente el brillo y reduce la opacidad, lo que da una mejor claridad sobre las películas moldeadas.

La orientación biaxial también mejora las propiedades de barrera de la película de PP y su baja temperatura en la resistencia al impacto.

#### **2.7.4. USOS.**

Muchos de los usos de ambas películas de PP son en el campo de los envases. Hay un campo en donde se está incrementando el uso de la película de PP orientada y es el de la laminación. Aquí se incluye el recubrimiento de mapas, cartas, cubiertas de revistas técnicas y cubiertas de libros. El acetato de celulosa también se utiliza en este campo, pero el PP es más barato debido a su baja densidad y es también dimensionalmente estable en condiciones de cambios de humedad. Una desventaja de la película de PP es que se necesitan adhesivos especiales para lograr una buena adhesión.

#### **2.8. POLI(METILPENTANO). TPX.**

---

Los polímeros de TPX son una clase de polímeros basados en el 4-metil-1-penteno como monómero principal. Este es copolimerizado con otros monómeros usando el catalizador del tipo Ziegler cuando un polímero isotáctico es formado. Presenta una claridad casi igual a una hoja de acrílico. Tiene la menor densidad de cualquier plástico que se encuentre en el mercado ( $0.83 \text{ g/cm}^3$ ) y un punto de reblandecimiento más alto que el PP. El punto de fusión es  $240^\circ \text{ C}$  pero mantiene su forma estable por encima de los  $200^\circ \text{ C}$ . Tiene buena resistencia química pero su permeabilidad al vapor y gases es alta.

No se han desarrollado aún usos comerciales.

## **2.9. COPOLIMEROS DE ETILENO/VINILACETATO. EVA.**

Teóricamente la proporción de acetato de vinilo en los copolímeros EVA puede variar de 1 a 99% pero comercialmente se usan productos con menos del 50% de acetato de vinilo. De estos, aquellos que contienen del 21 al 50% de acetato de vinilo son usados como aditivos para ceras y adhesivos y los copolímeros con propiedades para formar películas están en el rango de 1 a 20% de acetato de vinilo.

Las películas de EVA pueden ser hechas por extrusión por soplado y por moldeo en rodillos de enfriamiento. Las películas moldeadas tienen mejores propiedades ópticas, pero el soplado proporciona una película más correosa y es el método más sencillo para producir película encogible. Presenta alta elasticidad.

### **2.9.1. PROPIEDADES.**

Las propiedades de las películas de EVA varían de acuerdo con el porcentaje de acetato de vinilo en la molécula pero por lo general se puede comparar con el PEBD como sigue:

1. Su temperatura de sellado es menor.
2. La resistencia al impacto es mayor.
3. Mayor elasticidad.
4. Mejor resistencia a la ruptura por stress ambiental.
5. Mayor permeabilidad a gases y vapor húmedo.
6. Mayor flexibilidad.
7. Sus propiedades a baja temperatura son mejores.
8. Mayor tendencia al bloqueo.
9. Mayor coeficiente de fricción.
10. Puede ser sellado por calentamiento a alta frecuencia, pero se requiere mayor potencia que para el PVC.

11. Mejor impresión.

12. Mayor retención de cargas minerales.

Películas con más de 7-8% de acetato de vinilo se pueden considerar como PEBD modificado, pero aquellas con 15-20% de acetato de vinilo son más parecidas al PVC, con la ventaja de que la flexibilidad es inherente y no depende de la adición de plastificantes.

## **2.10. POLI(1-BUTENO).**

---

El 1-buteno es el siguiente escalón después del PP en la familia de las poliolefinas y polimeriza con la adición de catalizador del tipo Ziegler. Inicialmente cristaliza en la forma tetragonal FORMA II que cambia en un período de 3 a 6 días a la forma más estable que es la hexagonal FORMA I. La transformación se acompaña con incremento en la densidad, rigidez, tensión y dureza.

### **2.10.1. PROPIEDADES.**

El polibuteno da una película correosa con buena resistencia al desgarre, resistencia a la perforación y resistencia al impacto. Supera en estas propiedades al PEBD pero tiene densidad similar ( $0.915 - 0.92 \text{ g/cm}^3$ ). El punto de fusión de polibuteno es similar al del PEAD ( $125^\circ \text{ C}$ ). Conserva sus propiedades a elevadas temperaturas, lo que lo hace útil para aplicaciones en envases llenados en caliente.

El polibuteno tiene en general propiedades químicas similares al PEBD, pero es mucho más resistente a rupturas ambientales. Es buena barrera para el vapor pero no así para los gases.

La película de polibuteno puede ser sellada con calor para dar sellos más fuertes en aquellos casos en donde el sellado es hecho en línea después de la extrusión.



## 2.10.2. USOS.

La película de polibuteno ha sido usada para bolsas de leche, pero su dureza hace que sea más utilizado en empaques industriales o para impermeables.

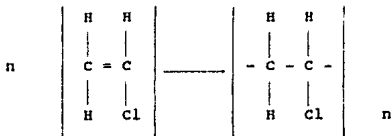
## 2.11. VINILOS.

---

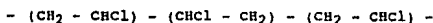
La familia de plásticos de vinil se produce por la adición en la polimerización de ciertos sustituyentes etilenos. La sustitución es de un átomo de hidrógeno solo y puede ser como átomo único o como un grupo de átomos tales como el grupo acetato, en el caso del acetato de vinilo. En un sentido más amplio, los polímeros de vinilo incluyen materiales tales como poliestireno (basado en el estireno  $-\text{CH}_2-\text{CH}.\text{C}_6\text{H}_5$ ) pero en general el término es tomado por el cloruro de polivinilo (PVC) copolímeros de cloruro de vinilideno/cloruro de vinil, copolímeros de cloruro de vinilo/acetato de vinilo y alcohol vinílico. El acetato de polivinilo es también uno de los vinilos más comunes pero solo se utiliza en forma dispersa como un adhesivo o como base para pinturas emulsionadas.

### 2.11.1 CLORURO DE POLIVINILO. PVC.

El PVC está hecho por la adición polimérica de cloruro de vinilo. La reacción total se muestra abajo:



Observando la estructura de la molécula del cloruro de vinilo, se ve que se pueden adicionar moléculas a la cadena en crecimiento, cabeza con cabeza (fig. II.5), cabeza con cola (fig. II.6) o también puede ser un arreglo desordenado.



**FIG. II.5 Cabeza - Cabeza.**



**FIG. II.6 Cabeza - Cola.**

El PVC es un ejemplo de arreglo cabeza - cola pero es un polímero amorfo ya que polimeriza en la forma atáctica.

Se puede hacer película de PVC por medio de la técnica de extrusión por soplado o por extrusión mediante dado y ambos procesos son ampliamente usados para producir películas de calibre delgado. Una de las dificultades con la extrusión de PVC es la inestabilidad térmica a las temperaturas de proceso, combinada con una alta viscosidad. Con poliestireno o poliolefinas, la viscosidad puede ser reducida incrementando la temperatura de proceso, pero la inestabilidad térmica del PVC no permite que esta solución sea utilizada. Las cabezas de los dados deben ser diseñadas cuidadosamente para prevenir un estancamiento del flujo.

La forma más utilizada para convertir el PVC en hoja o película es por medio del calandrado. Un amplio rango de películas de PVC con propiedades variables pueden obtenerse del polímero básico. Las dos variables importantes son la formulación y la

orientación. Cambios en la formulación producen películas que van desde rígidas a películas flexibles, estirables. El grado de orientación puede variar de completamente uniaxial a biaxial balanceada.

### **2.11.1.1 PROPIEDADES.**

#### **2.11.1.1.1 NO PLASTIFICADO.**

El PVC no plastificado tiende a degradarse y decolorarse a temperaturas muy cercanas a aquellas utilizadas en el procesamiento, así que deben incluirse estabilizadores en la formulación. Si el estabilizador es eficiente, entonces se obtienen películas claras y brillantes. La densidad es alta ( $1.35-1.41 \text{ g/cm}^3$ ) comparada con el polipropileno ( $0.90 \text{ g/cm}^3$ ) y el polietileno ( $0.92-0.96 \text{ g/cm}^3$ ).

La permeabilidad al vapor de agua del PVC es más alta que la de las poliolefinas en general pero es adecuada para varios propósitos. La permeabilidad de gases es baja.

La película de PVC no plastificado tiene excelente resistencia a aceites, grasas y lípidos y es resistente a ácidos y álcalis. Es ablandado por ciertos solventes, particularmente hidrocarburos clorados y cetonas.

#### **2.11.1.1.2 PLASTIFICADO.**

Las propiedades del PVC plastificado dependen del plastificante utilizado, así como de la cantidad. En general, un incremento en la cantidad de plastificante incrementa la flexibilidad y suavidad de la película e incluso mejora las propiedades a baja temperatura.

El PVC plastificado presenta olor y es atacado por solventes. La película de PVC plastificado puede obtenerse con excelente brillo y transparencia si el estabilizador y plastificante usados son los correctos.

Ambas películas, la plastificada y la no plastificada, pueden ser selladas con técnica de soldadura de alta frecuencia. Es posible la impresión en ambas películas sin un tratamiento previo de la superficie.

### **2.11.1.2 USOS.**

La mayoría de las aplicaciones de la película de PVC cae dentro del campo de los envases.

Una gran cantidad de PVC plastificado se utiliza en espesores mayores de 250 micras y es por eso que se le puede considerar como hoja, aunque en realidad, en este caso no hay ninguna diferencia. El PVC se utiliza para cortinas (particularmente cortinas para baño), tela para manteles e impermeables ligeros. También se utiliza en el hogar como hojas decorativas.

Industrialmente, la película de PVC se utiliza como recubrimiento de protección de equipo, así como para forro de tambores de metal, para prevenir la corrosión cuando se transportan ciertos líquidos.

### **2.11.2 CLORURO DE POLIVINILIDENO PVDC.**

Las películas que se usan normalmente, son de hecho, copolímeros de cloruro de vinilideno y cloruro de vinilo, pero se denominan por lo general PVDC.

Ambos métodos de extrusión, moldeado y soplado, son utilizados en la producción de películas de PVDC, aunque la extrusión por soplado es la preferida para la producción de película orientada. Si la película de PVDC es producida por extrusión a través de un dado, después debe ser templada, ya sea extruyéndola dentro de un baño de agua fría o bien moldeándola sobre rodillos enfriados, para así inhibir la cristalización. Se requiere una cristalización mínima para obtener una película extensible.

### **2.11.2.1 PROPIEDADES.**

La película orientada de PVDC es una película clara con buenas características de resistencia, particularmente resistencia a la ruptura. Es sellable mediante calor a temperaturas relativamente bajas (120 - 158° C) pero no es estable cuando se calienta por encima de los 60° C. Tiene gran resistencia a la propagación del desgarre pero es de difícil manejo en empaque de equipo.

La característica principal del PVDC es la baja permeabilidad al vapor de agua y gases. Se utiliza como componente en la coextrusión de película laminada porque puede proveer de propiedades de barrera adecuadas cuando se producen películas de calibre demasiado delgado para ser manejadas fácilmente. También es utilizado para cubrir una gran cantidad de sustratos, tales como papel, celulosa regenerada y polipropileno.

### **2.11.3 COPOLIMEROS CLORURO DE VINILO/ACETATO DE VINILO.**

En estos copolímeros el agrupamiento de acetato es más voluminoso que el átomo de cloruro y sirve para prevenir contacto cercano de las cadenas de polímeros. Funciona, por tanto, como un plastificante interno. Si se requiere mayor flexibilidad se pueden adicionar plastificantes comunes. El material es utilizado más en forma de hoja que de película, una aplicación importante es la manufactura de discos de larga duración.

### **2.11.4 ACETATO DE POLIVINILO. PVA.**

El acetato de vinilo también puede ser polimerizado solo para dar un material con similitudes con el PVC pero con mucha mayor solubilidad en solventes orgánicos. El PVA no se utiliza como película, pero es importante como adhesivo en laminación.

### **2.11.5 ALCOHOL POLIVINILICO.**

El alcohol vínflco no existe, y el alcohol polivinílico se produce mediante la hidrólisis del acetato de polivinilo. Es un polímero poco usual ya que es soluble en agua, por lo tanto, generalmente se utiliza en la fabricación de película para hacer saquitos, con los cuales se mantiene el control de dosificación en agua. El saquito y su contenido son simplemente adicionados a la cantidad adecuada de agua, el saquito se disuelve y el contenido es liberado. Este método es valioso cuando el contenido es tóxico o si existe alguna otra razón para que no se pueda tocar.

### **2.12 IONOMEROS.**

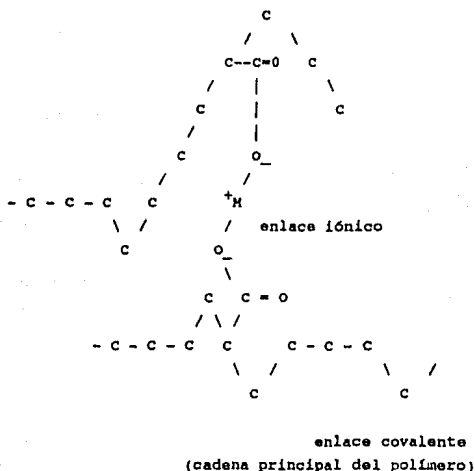
---

La palabra ionómero fue creada para describir una nueva familia de polímeros que contienen enlaces, tanto iónicos como covalentes. Los enlaces covalentes son los usuales entre los átomos separados en cada cadena de polímeros, mientras que los enlaces iónicos existen entre las cadenas. Los enlaces iónicos son más poderosos que las fuerzas de atracción normales entre cadenas de polímeros y modifican un número de propiedades del polímero.

Los ionómeros fueron desarrollados por la compañía DuPont y se venden bajo la marca Surlyn A.

Los Surlyn A se basan en el etileno y se asemejan al polietileno en muchas de sus propiedades. Sin embargo, los grupos carboxil están localizados en intervalos a lo largo de la cadena de polímero, lo que significa la copolimerización y esto provee la porción aniónica de los eslabones cruzados iónicos. La porción catiónica de los eslabones es suplida por iones metálicos. Los iones metálicos usados son sodio, potasio, magnesio y cinc. Un ionómero típico contiene 2.8% de sodio, lo que equivale a 17 átomos de

sodio en 1,000 átomos de carbono. Una representación esquemática se da en la siguiente figura:



**FIG. II.7 Representación esquemática de la estructura de un ionómero.**

Los eslabones iónicos entre las cadenas refuerzan al polímero, sin embargo, destruyen su procesamiento al ser derretido. Los eslabones iónicos son fuertes pero no tanto como los eslabones cruzados covalentes convencionales. Con los eslabones iónicos la aplicación de calor produce un debilitamiento y es posible procesarlo mediante todas las técnicas termoplásticas convencionales. Las características contráctiles de los ionómeros son muy buenas, es por esto que funcionan bien en el recubrimiento por extrusión y en aplicaciones de empaque.

Las fuerzas iónicas tienen también un fuerte efecto en la morfología cristalina. El PEBD mismo, es un polímero semicristalino y solo presenta una buena claridad cuando la película es templada rápidamente, con la consecuente inhibición en el crecimiento de espirulitas. Las fuerzas iónicas en los ionómeros prácticamente eliminan todas las trazas de espirulitas visibles y por eso presentan excelente claridad. Esto no va acompañado con una reducción en la resistencia al impacto como lo es en la producción de película de PEBD de alta claridad.

Los ionómeros no cambian su apariencia al ser expuestos a cualquier solvente orgánico a temperatura ambiental. Ningún tipo de ataque a la superficie es observado en los ionómeros y tampoco pueden ser completamente disueltos en ningún solvente comercial incluso a temperaturas elevadas.

### **2.12.1 PROPIEDADES.**

Los ionómeros son materiales flexibles, correosos, con buena claridad. Bajo condiciones de prueba similares, el ionómero comercial resiste tensiones a  $-99^{\circ}\text{C}$  mientras que el PEBD falla a  $-68^{\circ}\text{C}$ . Un incremento en la resistencia a la fusión es importante por las siguientes razones:

1. Determina qué tan contráctil es en un tiempo dado, para un cierto espesor de película.
2. Qué tan resistente es a la perforación durante el proceso.
3. Qué tan tieso puede ser el producto para ser la base de empaques.

Los ionómeros son aproximadamente 10 veces más correosos que el PEBD en estado fundido, esto significa que los objetos afilados pueden ser empacados en películas ionómeras a mayor velocidad sin peligro de que esta se perfora.



## **2.13 POLIMEROS Y COPOLIMEROS DEL ESTIRENO.**

### **2.13.1 POLIESTIRENO.**

El poliestireno es producido por la polimerización del estireno,



líquido, hirviendo a una temperatura de 145° C. El método más simple para la polimerización es calentando estireno, pero la reacción misma desprende calor que posteriormente resulta muy difícil de remover.

Otro método de polimerización es suspender el estireno en agua, por medio de agitación rápida, junto con un estabilizador, soluble en estireno, tal como el peróxido de benzoílo. Si la agitación se lleva a cabo correctamente, el estireno se dispersa en pequeñas gotas las cuales polimerizan, dando como resultado perlas de poliestireno.

La película de poliestireno puede fabricarse mediante la extrusión por soplado o por extrusión mediante un dado. Es una película intrínsecamente quebradiza y no es apta para la aplicación en empaques si no es modificada. Sin embargo es utilizada en aplicaciones eléctricas en la forma de capacitores dieléctricos. Si se orienta biaxialmente el poliestireno, se resuelve el problema de quebrantamiento y da como resultado una película clara, con propiedades espumantes.

#### **2.13.1.1 PROPIEDADES.**

Además de poseer excelente claridad y brillo, y de ser espumante, el poliestireno orientado biaxialmente es rígido y tiene alta resistencia a la tensión. Tiene un índice de refracción alto (1.59) y un punto de reblandecimiento aproximadamente entre 90 y 95° C.

Presenta permeabilidad media a los gases (siendo más permeable que el PP pero menos que el PEBD) pero una alta permeabilidad al vapor de agua. La transmisión de vapor de agua decrece rápidamente a temperaturas menores de 0° C por lo que se utiliza como empaque de alimentos a bajas temperaturas.

Químicamente es resistente a ácidos fuertes y álcalis y es insoluble en hidrocarburos alifáticos y alcoholes menores. Es, sin embargo, soluble en hidrocarburos aromáticos, alcoholes mayores, ésteres e hidrocarburos clorados.

### **2.13.2 POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO.**

Además de la orientación de las películas de poliestireno para aumentar la resistencia al impacto, que por otro lado resulta muy cara, existe otro método para lograr ésto, y es la incorporación de caucho sintético.

Existen dos métodos para lograrlo:

1. Mediante el mezclado mecánico del caucho y el poliestireno en un mezclador de 2 rodillos o en un mezclador interno.
2. La polimerización interna de una solución de caucho en estireno.

#### **2.13.2.1 PROPIEDADES.**

El poliestireno de alto impacto es más flexible y tiene mayor resistencia al impacto, pero esto viene acompañado con una disminución de la resistencia a la tensión y térmica. Presenta una mayor elongación a la ruptura. Las propiedades químicas son prácticamente iguales a las del poliestireno no modificado.

El poliestireno de alto impacto es un material excelente para ser termoformado. Las aplicaciones de la película de poliestireno de alto impacto se encuentran en el campo de los empaques y de los papeles sintéticos.

### **2.13.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO.**

#### **2.13.3.1 PROPIEDADES.**

La película de poliestireno expandido tiene una estructura de células no comunicadas y por esto no retiene agua. Es un buen material acojinante (cuando se usa con espesor suficiente) y tiene buenas propiedades como aislante térmico. Presenta una superficie atractiva, no es abrasiva y puede ser termoformado para la fabricación de cubetas, contenedores, etc.

Inicialmente la película tiene una densidad de aproximadamente 120-160 g/l pero se puede reducir a 40-80 g/l.

### **2.13.4 COPOLIMERO DE ESTIRENO/ACRILONITRILLO.SAN.**

El copolímero de estireno/acrilonitrilo se produce por técnicas de polimerización en suspensión o emulsión, similares a las del poliestireno.

#### **2.13.4.1 PROPIEDADES.**

Estos copolímeros tienen mejor resistencia química, mejor dureza de superficie y resistencia a estropearse que el homopolímero de estireno. Tienen buena resistencia al agua y esto permite que el copolímero tenga aplicaciones en exteriores.

### **2.13.5 ACRILONITRILLO/BUTADIENO/ESTIRENO.ABS.**

Hay diversos métodos para hacer los co- y terpolímeros, pero los principios generales se pueden ver en los siguientes ejemplos:

1. El estireno y el acrilonitrilo se adicionan a una emulsión de polibutadieno y la mezcla se agita y se calienta a 50° C. Se adiciona un iniciador soluble en agua, como el persulfato de potasio y la mezcla es polimerizada.
2. Una goma látex de butadieno/acrilonitrilo se adiciona a un látex de estireno/acrilonitrilo. La mezcla se coagula y se esprea.

### 2.13.5.1 PROPIEDADES.

Las propiedades varían mucho de acuerdo con la composición y el método de fabricación. En general el ABS tiene buena resistencia al impacto, buena resistencia química y es bastante correoso. Es atacado por metil-etil-cetona y por ésteres. Las películas y las hojas presentan diversas aplicaciones, sin embargo, los materiales más delgados son termoformados para producir tuberías y cubetas.

De una manera general se ha hablado de una gran parte de las películas más importantes, sus propiedades y usos, así como, en algunos casos su método de obtención. Como es de suponerse no está dentro de este trabajo ampliarse mucho en cuanto a las características de todas las películas plásticas que se han obtenido hasta hoy en día ya que el asunto que nos ocupa es la aplicación de un nuevo método de pigmentación blanca de películas de polietileno exclusivamente. Sin embargo consideramos que no está de más sentar precedente de la existencia de la gran variedad de películas plásticas.

### **III. EFECTO DE LOS TITANATOS EN LA INCORPORACION DE AGENTES MINERALES A LOS COMPUESTOS ORGANICOS.**

#### **3.1 INTRODUCCION.**

---

La totalidad de la película de polietileno que se consume en el país se obtiene por dos métodos:

1. Extrusión tubular.
2. Extrusión plana o calandrada.

Como su nombre lo indica, la extrusión tubular consiste en forzar una masa de polietileno semifluida, mediante el empleo de un tornillo, hacia un orificio que tiene la forma de una corona circular, llamado dado. La masa fundida de poliolefina sale por la boquilla circular y mediante inyección de aire se produce un globo, el cual, por medios mecánicos, se eleva y se conduce hasta un par de rodillos colapsantes que transforman al globo en una superficie plana de dos capas. Los rodillos colapsantes, además de aplastar el globo, retienen el aire para que la burbuja mantenga uniformes sus dimensiones. Las orillas del globo colapsado se cortan y se obtienen dos películas planas de poliolefina, las cuales se embobinan por separado y comúnmente se someten a una oxidación inducida, por medio del llamado tratamiento corona.

En la extrusión plana o calandrada, el procedimiento de extrusión es prácticamente el mismo, con la variante de que la boquilla o dado, en lugar de ser una corona circular, es una recta. Como consecuencia de esto, del dado sale una hoja que para enfriarse hace contacto, inmediatamente después de haber salido, con un cilindro metálico por cuyo interior circula agua a temperatura controlada.

Como se deduce de la descripción anterior, en el proceso tubular el aire enfría el interior y el exterior de la burbuja, en tanto que en el proceso plano el enfriamiento se consigue por el contacto con la superficie del cilindro metálico.

La diferencia de procesos origina diferencias de propiedades físicas de las películas. La obtenida por el proceso tubular es más resistente al rasgado y a la tensión, pero es menos transparente y menos brillante. La obtenida por el proceso plano tiene más resistencia en el sentido de avance de la máquina, que en sentido transversal y, como se indicó anteriormente, menos resistencia que la tubular, sin embargo es más apreciada por su brillo y por su transparencia, particularmente para trabajos finos de impresión.

La parte más importante del equipo de extrusión la constituyen el tornillo y su receptáculo mecánico.

El extrusor tiene una función muy importante en el mezclado y en la homogeneización de la masa plástica que se extruye, por ello el diseño del tornillo es un asunto muy tecnificado.

Para diseñar o seleccionar un tornillo es de vital importancia el conocimiento de las propiedades reológicas de la masa que se va a extruir, fundamentalmente la termoviscosidad. Es también imprescindible el establecer con precisión el tipo de flujo que va a regir el desplazamiento de la masa fundida en el interior del extrusor. Normalmente las poliolefinas fluyen de una manera no Newtoniana y las propiedades de la película que se extruye dependen de la presión, de la temperatura y del perfil o diseño del tornillo.

El estudio de la fluidez de los cuerpos sometidos a tensiones constituye el objeto de la REOLOGIA que proviene del griego RHEOS, sinónimo de flujo.

En los casos en que se presentan los fenómenos de fluencia y formación de "cuello" se dice que el material ha llegado a su límite plástico. En ambos casos los átomos componentes del material se deslizan o fluyen entre sí. Existen ciertas sustancias que sufren este deslizamiento a temperaturas muy bajas, dando lugar al fenómeno de plasticidad. Los sólidos plásticos tienen un límite plástico o carga de fluencia muy bajo y se deforman continuamente al someterlos a cargas superiores a dicho límite.

Bajo la carga de fluencia el plástico se deforma indefinidamente.

Fue B. de St. Venant el primero que explicó matemáticamente este comportamiento, por lo que los sólidos que presentan plasticidad se llaman sólidos de St. Venant.

Las sustancias sintéticas conocidas como plásticos recibieron inicialmente su nombre a causa de su comportamiento como tales.

Tanto los líquidos como los materiales plásticos quedan definidos por su posibilidad de fluir. La única diferencia entre líquidos y materiales plásticos estriba en que en un líquido no existe el límite de fluencia dado que fluye y se deforma bajo cualquier esfuerzo, incluso por su propio peso.

Las diferencias entre los sólidos plásticos o elásticos y los líquidos pueden considerarse desde el aspecto reológico, es decir, que dependen de su fluidez.

Como el extrusor es fundamentalmente un homogeneizador, la pigmentación o la incorporación de cargas y plastificantes a la masa principal de poliolefina se consigue haciendo un diseño específico para cada caso, pero es lógico suponer que la naturaleza química de las sustancias que tratan de homogeneizarse, y la proporción relativa de cada uno de los componentes deberán tomarse en cuenta en el diseño.

Mientras mas compatibles químicamente sean las cargas que se intentan incorporar dentro del extrusor, menos crítico deberá ser el diseño del tornillo al igual que las condiciones de operación, pero generalmente los requerimientos comerciales de la utilización de las películas, requieren de pigmentaciones que deben producir, en hojas muy delgadas, opacidades muy intensas.

Comercialmente los pigmentos disponibles en el mercado son de origen mineral, como el dióxido de titanio para la pigmentación blanca y el negro de humo para las pigmentaciones negras, los cuales son por naturaleza, incompatibles con la mayoría de las poliolefinas extrudables.

Se han hecho diversos intentos para conseguir una mayor incorporación de agentes minerales, como por ejemplo la fabricación de los llamados " master batch ", operación que consiste en extruir una mezcla de polietileno y dióxido de titanio en un extrusor de cañón corto a temperaturas muy inferiores a la temperatura de descomposición por oxidación del polietileno, usándose un dado que tiene varias perforaciones de diámetros inferiores a 0.5 cm.. La masa extruída fluye a través de estos orificios a manera de fideos, los cuales caen en un baño de agua fría y, una vez solidificados, pasan a una cortadora que los reduce al tamaño de la granalla del polietileno virgen.

En esta primera operación el aspecto del " master batch " no es importante ya que este se va a incorporar al polietileno virgen en una segunda operación de extrusión.

Como la presentación del " master batch " es menos importante que la preservación de las propiedades del polietileno, la operación se lleva a cabo en un extrusor de calidad mediana.

Por este camino se ha llegado a incorporar hasta un 40 % de agente inorgánico al polietileno, pero es entendible que esta masa si se extruyera, no daría una película de calidad aceptable.



El uso del "master batch" consiste en agregar no mas del 10 % al polietileno virgen que ahora si se va a extruir en una segunda operación de una manera fina para obtener una película pigmentada que recuerde lo mas posible a las propiedades de la película virgen.

Por este procedimiento se fabrican en la actualidad todas las películas pigmentadas en México, y el máximo de "master batch" que garantiza la calidad de la película es el 10 %.

El problema que esta situación origina es que cuando requerimos opacidades intensas, la película debe ser mas gruesa, lo que definitivamente afecta los costos.

Lo ideal serfa que el polietileno, que es un compuesto orgánico, pudiera pigmentarse con compuestos orgánicos que produjeran tonos y opacidades comparables a las de los pigmentos minerales, a los que el público consumidor está acostumbrado.

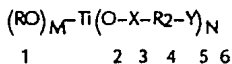
El objetivo primordial de esta investigación, es encontrar el enlace químico entre el pigmento inorgánico y las olefinas, tal que transforme en un complejo de comportamiento " orgánico " al pigmento mineral enlazado químicamente a la olefina.

El problema ya enunciado, como se hizo en párrafos anteriores, induce a la búsqueda de un producto comercial, de ser posible barato, que pueda hacer el tipo de enlace químico que nosotros deseamos.

Consultando la literatura especializada en la operación de extrusión de poliolefinas, principalmente las revistas " Paper, Film and Foil Converter " y " Modern Packaging ", se encontró que varias compañías norteamericanas y una compañía japonesa hicieron investigaciones exhaustivas sobre este tipo de agentes y sus conclusiones son coincidentes en que cierto tipo de titanatos actúan como un enlace químico que convierte a la poliolefina en un complejo orgánico en presencia de minerales

finamente divididos, cuando se hace una mezcla mecánica previa a la operación de extrusión.

En este trabajo se experimentó con los titanatos producidos en escala comercial desde 1976 por la compañía KENRICH PETROCHEMICAL de Bayona, New Jersey. La compañía fabrica una serie de titanatos que denomina "Titanate Coupling Agent", cuya fórmula general es:



El significado de esta fórmula se aclara fácilmente consultando la tabla que se incluye a continuación:

- 1 (RO) Grupo inorgánico de acoplamiento.
- 2 O Transesterificación y transalquilación.
- 3 X Grupo de unión.
- 4 (R<sub>2</sub>) Encadenamiento termoplástico (van der Waals).
- 5 Y Reactividad termosellante.
- 6 N Multifuncionalidad (estructura del ligante).
- M Estructura del ligante.

Nota: La función 6 trata sobre la multifuncionalidad, por ejemplo, la presencia en el KR-7 (no enlistado) de ambos grupos isoheptadecil (isoesteárico) y metacrilato en la misma molécula, lo que hace al KR-7 un híbrido del KR-TTS y KR-33BS.

TITANATO AMINTE DE ACOPLAMIENTO	ESTRUC-TURA DEL LIBANTE		FUNCION 1 (R) GRU-PO DE ACOPLAMIENTO INORGANICO	FUNCION 2 (O) GRUPO DE UNION
	M	N		
KR-TTS	1	3	Monoalcóxido	Carboxil
KR-201	1	2	Quelato	Carboxil
KR-33BS	1	3	Monoalcóxido	Carboxil
KR-133BS	1	2	Quelato	Carboxil
KR-39 BS	1	3	Monoalcóxido	Carboxil
KR-139BS	1	2	Quelato	Carboxil
KR-34BS	1	3	Monoalcóxido	Fenil
KR-134BS	1	2	Monoalcóxido	Fenil
KR-44	1	3	Quelato	Etileno
KR-9S	1	3	Quelato	Sulfonil
KR-12	1	2	Monoalcóxido	Fosfato
KR-112S	1	2	Quelato	Fosfato
KR-212	1	2	Quelato	Fosfato
KR-38S	1	3	Monoalcóxido	Pirofosfato
KR-138S	1	2	Quelato	Pirofosfato
KR-238S	1	2	Quelato	Pirofosfato
KR-58CS	1	3	Monoalcóxido	Pirofosfato
KR-158DS	1	2	Quelato	Pirofosfato
KR-62S	1	3	Monoalcóxido	Pirofosfatodo
KR-0262S	1	2	Quelato	Pirofosfato
KR-36C	4	2	Coordinado	Fosfito
KR-41B	4	2	Coordinado	Fosfito
KR-46B	4	2	Coordinado	Fosfito
KR-65	4	2	Coordinado	Fosfito

FUNCIÓN 4 (R2) COMPATIBILIDAD DE ENCA- DENAMIENTO TERMOPLÁSTICO	FUNCIÓN 5 (R2) REACTIVIDAD TERMOSE- SIVANTE
Isocetadecil	---
Isocetadecil	---
---	2 - alil
---	2 - alil
---	Vinil
---	Vinil
Cumil	---
Cumil	---
Etileno	Amino - imln
Dodecifenil	---
Dioctil	---
Dioctil	---
Dioctil	---
Dioctil	---
Dioctil	---
Dioctil	---
Dioctil	---
Butil, Octil	---
Butil, Octil	---
Butil, Metil	---
Butil, Metil	---
Ditridecil	---
Octil	---
Ditridecil	---
Ditridecil	All

TITANATO	ESTRUCTURA QUIMICA
KR-TTS	Titanato isopropil trisoesteárico
KR-201	Titanato diisoesteárico etileno
KR-33BS	Titanato isopropil trimetacrílico
KR-133BS	Oxacetato de titanio dimetacrilato
KR-39BS	Titanato isopropil triacrílico
KR-139BS	Oxacetato de titanio triacrílico
KR-34BS	Titanato isopropil tricumul fenilo
KR-134BS	Oxacetato de titanio di(cumilfenolato)
KR-44	Titanato isopropil tri(N etilamino-etilamino)
KR-9S	Titanato isopropil tridodecibencensulfoni
KR-12	Titanato isopropil tri(dioctilfosfato)
KR-112S	Oxacetato de titanio di(dioctilfosfato)
KR-212	Titanato di(dioctilfosfato) etileno
KR-38S	Titanato isopropil tri(dioctilpirofosfato)
KR-138S	Titanato di(dioctilpirofosfato) oxacetato
KR-238S	Titanato (dioctilpirofosfato) etileno
KR-58CS	Titanato isopropil octil, butil pirofosfato
KR-158DS	Oxacetato de titanio di(butil, octil pirofosfato)
KR-62S	Titanato isopropil di(metil, butil pirofosfato)
KR-262S	Titanato di(butil, metil, pirofosfato) etileno
KR-36C	Titanato tetraisopropil di(tridecilsfosfito)
KR-41B	Titanato tetraisopropil di(dioctilfosfito)
KR-46B	Tetraoctiloxítitanio di(ditridecilsfosfito)
KR-55	Tetra (2,2 dialcoxmetil-1 butoxi titanio) di(di-tridecils) fosfito

**TABLA III.1**

En la Tabla III.1 se muestran los diferentes titanatos que se utilizaron en esta investigación, además de sus grupos funcionales y su estructura química. Todos ellos son productos de la compañía KENRICH PETROCHEMICAL.

Se ha encontrado que los titanatos al ser incorporados al polímero presentan la capacidad de formar complejos orgánicos con las cargas minerales y el polímero.

En este trabajo no se adentrará en el conocimiento de las reacciones que se efectúan entre el titanato, el polímero y la carga mineral puesto que dicho tema entra en el campo de la química de los complejos y puede ser mejor desarrollado por un químico orgánico, un químico inorgánico o bien por la conjunción de ambos conocimientos.

El tipo de complejo formado es un complejo organometálico que al ser extruído en un equipo adecuado mantiene las características del polímero virgen con las ventajas de incluir la carga mineral deseada para obtener películas pigmentadas, reduciendo la cantidad de resina de polímero requerida, con la capacidad de aceptar mayor cantidad de carga mineral para así abaratar el costo de la película pigmentada.

El problema que atacaremos en este trabajo es el del mezclado de un compuesto orgánico con cargas minerales.

Como se menciona anteriormente, los compuestos orgánicos y los inorgánicos no presentan afinidad química, por lo que al unirse no lo hacen químicamente, no reaccionan entre sí, sino que se mezclan únicamente, con las desventajas que esto presenta para el equipo y el producto mismo.

A continuación se explicará el proceso de mezclado , como operación en el procesamiento de polímeros.

### **3.2. MEZCLADO.**

---

El mezclado es una operación muy importante en el procesamiento de polímeros. Ejemplos sobre el proceso de mezclado son: la dispersión de negro de humo en polietileno , llevada a cabo en un Banbury, la dispersión del componente de la fórmula del caucho en la fabricación de rodillos y la mezcla de dos polímeros en un extrusor.

En todas las operaciones de mezclado, lo importante es el grado de incorporación, lo que podría denominarse como " bondad " de la mezcla. Resulta muy difícil llevar a cabo análisis sobre el proceso de mezclado, es por esto que solamente se ha realizado en unos cuantos casos especiales, y el progreso en esta operación ha sido muy lento, particularmente en el campo de los polímeros.

Una mezcla consiste en dos o mas componentes identificables. El componente de mayor concentración se conoce como Componente Mayor y el otro como Componente Menor. Esto se puede extender a sistemas multicomponentes considerando como componente Menor al componente en turno y como componente Mayor al resto de los componentes mezclados.

Lo que se conoce como " partículas últimas " son las partes mas pequeñas del componente menor, normalmente existentes durante el curso del mezclado. El tamaño de estas partículas varía, pueden ser moleculares, coloidales, microscópicas o mas largas. En una solución real las partículas últimas son las moléculas mismas. El mezclado en seco de polvos moldeables muestra un ejemplo donde las partículas últimas son muy largas.

El término "mezclado simple" se utiliza para cualquier operación que incremente el desorden de la distribución espacial de las partículas últimas, sin reducir su tamaño. En el mezclado simple las partículas últimas del sistema pasan, del arreglo menos probable, al arreglo mas probable.

La entropía del sistema se incrementará al ir progresando el mezclado y alcanzará su máximo cuando la configuración empiece a ser desordenada. En la práctica la medición de otras propiedades distintas a la entropía (que es directamente medible) se realiza en muestras sacadas de la mezcla o en pequeños elementos que se encuentran en la misma. Los datos obtenidos se manejan por métodos estadísticos para poder estimar el progreso de la mezcla. Agentes tales como la luz o la corriente eléctrica pueden penetrar varias mezclas y dar información que puede ser usada para la caracterización.

El término "mezclado dispersivo" se aplica a aquellos procesos de mezclado que reducen el tamaño de las partículas últimas al mismo tiempo que desordenan sus posiciones. La preparación de un "master batch" de negro de humo en polietileno realizado en el Banbury es un ejemplo de este tipo de proceso. En este proceso, las partículas últimas antes de la mezcla, son los aglomerados de negro de humo, que son de tamaño coloidal. Después del mezclado son las partículas mismas. El análisis de un proceso de mezclado dispersivo es similar al del mezclado simple, excepto que una complicación adicional se presenta, se deben considerar la naturaleza o la magnitud de las fuerzas requeridas para romper las partículas últimas.

Muchos procesos de mezclado simple ocurren espontáneamente o naturalmente por ejemplo, dos líquidos miscibles se mezclarán por sí solos, a pesar de que se requiera un largo tiempo para que esto ocurra. El mecanismo de estos procesos naturales de mezclado es la difusión molecular. Siempre que las partículas últimas sean de tamaño molecular, la difusión puede ser un factor importante, sin embargo cuando la velocidad de difusión es muy lenta, la difusividad de mezclado deja de ser importante.

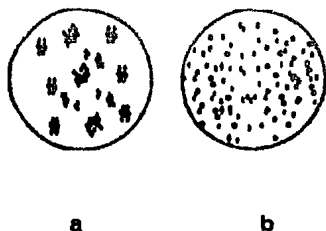


En las mezclas donde no hay difusividad, las partículas deben ser puestas en movimiento por algún agente externo. Si el componente mayor es un fluido y puede hacerse turbulento el mezclado será rápido, como ocurre en los gases y los líquidos de baja viscosidad. Cuando la viscosidad del líquido es alta, como en el caso de los polímeros fundidos y de las soluciones, es casi imposible alcanzar la turbulencia por lo que se tendrá un mezclado laminar que se realizará a una velocidad menor.

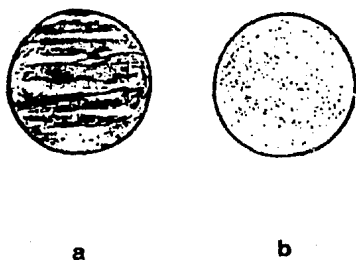
Una descripción completa sobre el estado de una mezcla debe involucrar el tamaño y posición de cada partícula última, por lo que es casi imposible tener una descripción completa. Generalmente una mezcla puede ser caracterizada adecuadamente por su uniformidad total, su textura y su estructura local.

Para ilustrar el significado del término uniformidad total se considerará la extrusión de polietileno que contiene aproximadamente un 2 % de negro de humo en un número de granallas seleccionadas al azar de varias partes de la mezcla. Si la mezcla fuera totalmente uniforme, entonces la concentración seguiría la Ley de Distribución Binomial. La desviación de la distribución observada de la teórica puede ser utilizada como medida del grado de uniformidad de la mezcla.

Para poder hablar de la textura y de la estructura local de una mezcla, es necesario hablar de la "escala de examinación", esto se refiere al tamaño de las muestras tomadas de la mezcla para ser analizadas. Con una escala de examinación del mismo orden del tamaño de las partículas últimas, una muestra deberá contener un número, relativamente pequeño, de partículas últimas, y aparentemente será de grano grueso. Con una escala de examinación grande con respecto al tamaño de las partículas últimas, la muestra tendrá muchas partículas últimas y será en apariencia de grano fino. Las figuras III.1 y III.2 son representaciones de ambos tipos de muestra.



**FIG. III.1 Ejemplos de mezclas de grano grueso, a) mezcla pobre  
b) buena mezcla.**



**FIG. III.2 Ejemplos de mezclas de grano fino, a) mezcla pobre  
b) buena mezcla.**

Se ve claramente que el granulado de una muestra no es el indicador de la naturaleza de una mezcla. Todo esto es relativo según la escala de examinación.

Para investigar la textura de una mezcla se debe utilizar una escala de examinación mayor en comparación al tamaño de las partículas últimas. La caracterización de muestras de grano fino ha sido discutida por Danckwerts (11) quien dice que no se trabaja con las partículas últimas sino con "grupos" del componente menor. Al proceder el mezclado los grupos comienzan a reducirse en tamaño y se diluyen en el componente mayor, lo que hace que cambie la textura de la mezcla.

Se deben especificar el tamaño, la forma, la concentración del componente menor y la localización de cada grupo para caracterizar completamente la textura de una mezcla. En la práctica se recurre a métodos estadísticos para realizar esto. Danckwerts propuso dos cantidades estadísticamente definidas, por analogía con la teoría estadística de turbulencia, la escala de segregación y la intensidad de segregación, que son las medidas del tamaño y concentración de los grupos respectivamente.

Para investigar la estructura local de una mezcla, se debe de utilizar una escala de examinación del mismo orden del tamaño de las partículas últimas. Cuando es posible la examinación microscópica, resulta ser el método más directo para determinar la estructura local. La figura III.1 representa un examen microscópico realizado en dos mezclas de polietileno y negro de humo.

Otras técnicas distintas a la observación microscópica tales como métodos ópticos utilizando microdensímetros, también se utilizan para el estudio de las estructuras. Independientemente del método utilizado, la escala de examinación debe ser del mismo orden del tamaño de las partículas últimas.

En general, se puede esperar que la uniformidad total sea una manera importante para caracterizar a las mezclas. El que la estructura local y la textura sean importantes en la caracterización de una mezcla depende de la función del componente menor. Por ejemplo, en la aplicación del polietileno negro, la función del negro de humo es simplemente colorear el polietileno. Aquí la estructura es poco importante, siempre y cuando la textura de la mezcla sea la adecuada. En otras aplicaciones la función del negro de humo es la de proteger al polietileno del ataque de los rayos ultravioleta. Aquí tanto la textura como la estructura local son importantes.

### 3.2.1 UNIFORMIDAD TOTAL O GRADO DE MEZCLADO.

Los métodos estadísticos que pueden ser utilizados para probar la uniformidad total de una mezcla y que también sirven para definir el índice de mezclado para caracterizar mezclas no uniformes se discuten a continuación. Se considera un caso especial donde el componente menor consiste en partículas últimas de tamaño uniforme y el componente mayor es un fluido. El componente mayor, el fluido, se divide en partículas hipotéticas del mismo tamaño que las partículas últimas del componente menor. Esto nos permite hablar del número de partículas del componente mayor en una muestra. El análisis de este caso especial se aplica igualmente a mezclas sólido-sólido donde todas las partículas tienen el mismo tamaño.

Si las partículas últimas del componente menor están distribuidas caóticamente dentro de la mezcla, la probabilidad de encontrar una es la misma en todos los puntos de la mezcla y es igual a la fracción de volumen del componente menor en la mezcla como un todo.

Si un número de muestras de igual tamaño (pequeño en comparación con la mezcla como un todo) se toman, la fracción del componente menor variará de muestra a muestra. Sin embargo se ha demostrado teórica y experimentalmente que las concentraciones de las muestras variarán de acuerdo a la ley binomial. Considerando el caso donde cada muestra contiene un total de  $n$  partículas y donde la fracción de las

partículas últimas del componente menor en la mezcla es  $p$  la probabilidad de escoger una muestra que tenga una fracción  $x = (b/n)$  de componente menor es:

$$P(x) = \left[ \frac{n!}{b!(n-b)!} \right] p^b (1-p)^{(n-b)} \quad \text{-----(1)}$$

donde  $b$  es el número de partículas últimas del componente menor en la muestra.

Esta es la función de frecuencia binomial. Si la concentración de un número de muestras varía de acuerdo con esta ley, entonces su varianza está dada por la fórmula:

$$\sigma^2 = \frac{p(1-p)}{n} \quad \text{-----(2)}$$

Para determinar si la mezcla es o no totalmente uniforme, uno debe tomar muestras, analizarlas y entonces determinar si las composiciones de las muestras estan distribuidas de acuerdo a la ley de la distribución binomial. Si así es, la mezcla es totalmente uniforme.

Weindenbaum (12) afirma que para la mayoría de los problemas en mezclado de sólidos, la distribución puede caracterizarse por la media y la varianza.

La media de  $N$  muestras esta definida por la ecuación:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{-----(3)}$$

donde  $x_i$  representa la concentración de las partículas últimas del componente menor en la  $i$ -ésima muestra. Nótese que  $\bar{X}$  media no debe diferir significativamente de  $p$ , la fracción del componente menor de la mezcla. Si estas dos cantidades difieren, la técnica del muestreo probablemente falla.

La varianza  $S^2$  de las mediciones está definida por la ecuación:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \quad \text{---- (4)}$$

que puede ser calculada también por la fórmula

$$S^2 = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right] - \left[ \frac{1}{N(N-1)} \left[ \sum_{i=1}^N x_i \right]^2 \right] \quad \text{----- (5)}$$

Si la mezcla ha sido apropiadamente muestreada, entonces  $X$  no debe diferir significativamente de  $p$ . Se puede utilizar la proporción normal para determinar si cualquier diferencia observada es significativa. Esta prueba se aplica calculando la cantidad

$$Z = \frac{(\bar{X} - p)N}{S} \quad \text{----- (6)}$$

y por referencia de la tabla de estandarización de distribución normal.

En la comparación de  $S^2$  contra  $\sigma^2$  si la relación  $(S/\sigma)$  es cercana a la unidad se puede concluir que las concentraciones de las muestras varían de acuerdo a la distribución binomial y que la mezcla es caótica.

Muchos métodos han sido propuestos para especificar el grado de mezclado. Aquellos que son mas usados estan basados en cantidades que son estadísticamente significativas, tales como la varianza o la desviación estándar.

La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza y también puede usarse para definir el índice de mezclado:

$$M = \frac{\sigma}{S} \quad \text{---- (7)}$$

### 3.2.2. TEXTURA.

Para la caracterización de la textura la escala de examinación es muy grande comparada con el tamaño de las partículas últimas, pero es pequeña comparada con la mezcla como un todo. En este caso es importante hablar de la concentración en un punto que se designa con  $X$ .

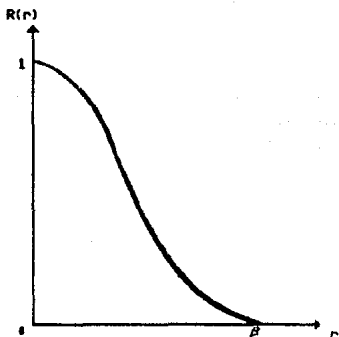
Si la concentración se determina en dos puntos separados por la distancia  $r$ , entonces el par de concentración se representa como  $(X', X'')$ . El coeficiente de correlación  $R(r)$  está definido por la ecuación.

$$R(r) = \frac{1}{N_s^2} \sum_{i=1}^N (X_i' - p)(X_i'' - p) \quad \text{---- (8)}$$

donde  $s^2$  representa la varianza de las mediciones de concentración y  $n$  es el número de parejas de puntos. La concentración total del componente menor en la mezcla es  $p$ .

En general,  $R(r)$  puede tomar cualquier valor entre cero y la unidad. Para valores pequeños de  $r$ ,  $R(r)$  se acerca a la unidad, dado que los puntos están tan cercanos, que se puede considerar que forman un grupo.

En el caso límite  $R(0) = 1$ . Para altos valores de  $r$ , el coeficiente de correlación tiende a cero, indicando una relación caótica entre las concentraciones en los pares de puntos. Si se grafica  $R(r)$  resulta una curva similar a la mostrada en la figura III.3



**FIGURA III.3 DIAGRAMA DE CORRELACION.**

Esta curva es llamada Diagrama de Correlación de la Mezcla.

### **3.2.3. MEZCLA LAMINAR SIMPLE.**

En la mayoría de los problemas que involucran una fase fluida, la velocidad de mezclado es incrementada haciendo el flujo turbulento. Este método para promover el mezclado es ampliamente utilizado con gases y líquidos con baja viscosidad. Cuando la fase fluida es un polímero de alta viscosidad, no se puede crear turbulencia, y el



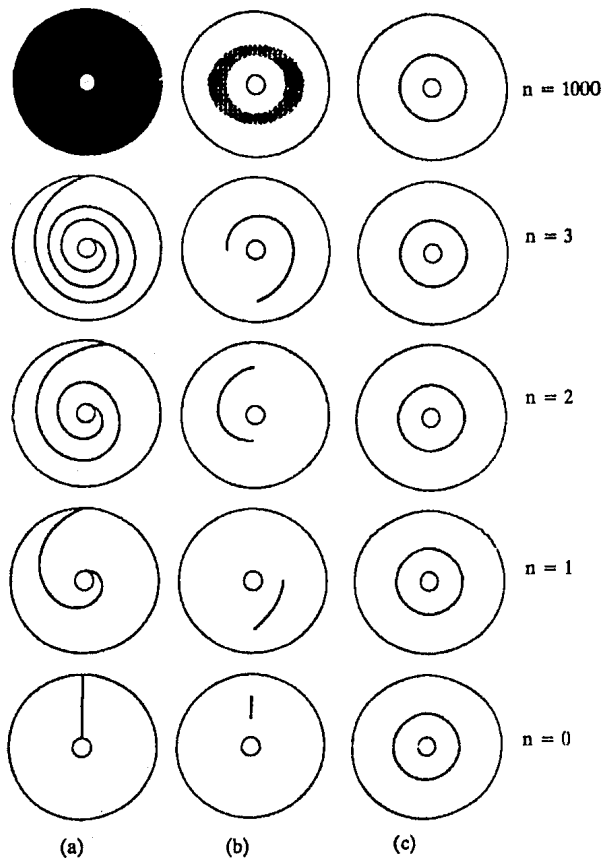
mezclado procede a una velocidad inherentemente mas baja. Es por ello que se hace una importante distinción entre mezclado laminar y turbulento.

Aquí se tratará con el mezclado simple laminar, no difuso, que es el tipo mas importante en el procesamiento de polímeros.

Un proceso de mezclado laminar no difuso se ilustra en la figura III.4, donde un fluido negro es mezclado dentro de un fluido blanco en un espacio anular formado entre cilindros concéntricos. En la figura III.4[a] el fluido negro es representado, inicialmente, por una línea radial que cruza desde el cilindro central estacionario hasta el cilindro exterior rotatorio.

Como el flujo es laminar, cada partícula del fluido se mueve en un sendero circular. Cuando el cilindro exterior completa una revolución, la partícula de fluido negro inmediata adyacente también completa una revolución, pero la partícula de fluido negro adyacente al cilindro interior estacionario permanece estacionaria. Las partículas intermedias entre estos dos extremos se mueven distancias intermedias. En los diagramas III.4[a] se muestra la configuración de las partículas negras con 1, 2, 3 y 1000 revoluciones respectivamente.

El efecto de la orientación inicial del componente menor en la eficiencia del proceso de mezclado se muestra en la figura III.4[b]. Aquí el fluido negro es una línea que cruza por el tercio central del área anular. Después de 1000 revoluciones, el fluido negro se distribuye únicamente a través de esta región. En la figura III.4 [c] la línea de fluido negro esta colocada de manera " aerodinámica ", descansando circularmente dentro del fluido blanco. Como de esta forma todas las partículas se mueven a la misma velocidad, no hay mezclado, así que después de las 1000 revoluciones el estado del mezclado del sistema es exactamente el mismo que al inicio.



**FIGURA III.4. Representación de un proceso de mezclado laminar, no difuso, entre cilindros concéntricos. La orientación inicial de los componentes y el esfuerzo cortante total determinan la extensión del mezclado.**

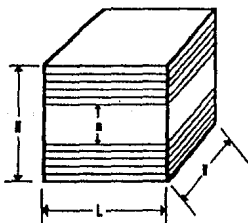
Si  $L$  representa el espacio anular y  $r$  la distancia que separa las líneas adyacentes, entonces,

$$r = \frac{L}{n+1} \approx \frac{L}{n} \quad \text{---- (9)}$$

donde  $n$  es el número de revoluciones. La cantidad  $r$  es llamada por Mohr (13) espesor del estrato.

En los ejemplos anteriores el decremento en el espesor del estrato está asociado con el incremento en el área interfacial. La relación entre ambas puede deducirse de la siguiente manera:

Considerando una masa de fluido con longitud  $L$ , ancho  $W$  y altura  $H$ , como se muestra en la figura III.5:



**FIG. III.5 Masa de fluido con  $n$  estratos de componente menor.**

Teniendo  $n$  estratos igualmente espaciados de componente menor, entonces el área total interfacial será  $A = 2nLW$ . El volumen total  $V = LWH$  se relaciona con  $r$  y con  $A$  por la ecuación

$$V = (LW)(H) = \frac{A}{2n}(nr) = \frac{rA}{2} \quad \text{----- (10)}$$

que muestra que el espesor del estrato es inversamente proporcional al área interfacial y directamente proporcional al volumen total de la mezcla.

La reducción del espesor entre estratos se asocia a la aparición de una nueva área interfacial. Si inicialmente el espesor del estrato es  $r_1$  y el área interfacial es  $A_1$ , entonces una disminución en el espesor del estrato a  $r$  requerirá un incremento en el área interfacial a  $A$ , estas ecuaciones se relacionan de la siguiente manera:

$$\frac{r}{r_1} = \frac{A_1}{A} \quad \text{----- (11)}$$

Ahora, considerando la deformación en la interfase del fluido bajo la acción de un esfuerzo cortante simple unidireccional donde  $\gamma$  es el esfuerzo cortante tenemos

$$\frac{A'}{A} = \sqrt{1 - 2\gamma \cos\alpha \cos\beta + \gamma^2 \cos^2\alpha} \quad \text{----- (12)}$$

donde los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  definen la orientación inicial de la interfase en el espacio. Combinando las 2 ecuaciones anteriores tenemos:

$$r = \frac{r_i}{\sqrt{1 - 2\gamma \cos\alpha \cos\beta + \gamma^2 \cos^2\alpha}} \quad \text{----- (13)}$$

Esta ecuación relaciona el comportamiento del espesor del estrato después de ser sometido a un esfuerzo cortante unidireccional con el espesor inicial y la orientación inicial de la interfase en el espacio.

En los problemas de mezclado de fluido-fluido, la relación de viscosidad de los componentes mayor y menor, puede ser un factor importante. Por ejemplo si la viscosidad del componente menor es mucho mayor que la del componente mayor, el componente mayor puede encontrarse bajo una deformación cortante extensiva, con el componente menor relativamente sin deformarse.

### 3.2.4. MEZCLADO EN EXTRUSORES.

El extrusor de tornillo se utiliza como un mezclador continuo en muchas operaciones de procesamiento de polímeros.

Como el movimiento del fluido dentro del canal del tornillo es laminar, el proceso de mezclado es del tipo simple laminar.

Para un sistema a volumen constante, la reducción en el espesor de los estratos se relaciona con la creación de una nueva área interfacial, la cual, a su vez, se relaciona con el esfuerzo cortante del fluido y la orientación inicial de la interfase.

El siguiente análisis está hecho sobre la base de un modelo de plato plano isotérmico del extrusor de tornillo. Aquí el fluido es Newtoniano.

Una partícula de fluido pasando a través del canal del tornillo describe una especie de hélice distorsionada. Durante el tiempo en que la partícula está en la parte

baja del canal, se mueve en dirección negativa con respecto al eje X. Cuando está en la parte superior se mueve en dirección positiva con respecto al mismo eje.

Una partícula moviéndose a través de la región baja en posición  $a$  se moverá a través de la región alta en posición complementaria  $a^0$ . Si la velocidad en cualquier posición es  $v_x$ , entonces  $a$  y  $a^0$  se relacionan por la ecuación

$$\int v_x da = - \int v_x da^0 \quad \text{--- (14)}$$

la que al ser integrada da como resultado

$$\begin{aligned} [a^2 - a^3] - [(a^0)^2 - (a^0)^3] \\ (0 < a \leq \frac{1}{2}) \\ (\frac{1}{2} < a^0 < 1) \end{aligned} \quad \text{--- (15)}$$

demostrando que  $a^0$  es función única de  $a$ . La figura III.6 es una curva de  $a^0$  vs.  $a$ .

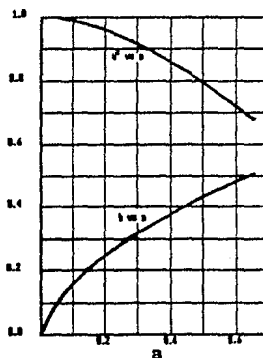


FIG. III.6. Gráfica de las funciones  $a^0$  y  $b$  contra  $a$ .

Representando por  $b$  a la fracción de tiempo que la partícula está en la parte superior del canal. Si  $v_x$  es su velocidad en la parte superior del canal, entonces

$$b = \frac{t^0}{t^0 + t} = \frac{1}{1 + \frac{t}{t^0}} \quad \text{---- (16)}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{|v_x^c|}{v_x}} = \frac{1}{1 - \frac{v_x^0}{v_x}} \quad \text{---- (17)}$$

donde la velocidad  $v_x$  esta dada por

$$v_x = V_x (2\alpha - 3\alpha^2) \quad \text{---- (18)}$$

Si introducimos esta ecuación en la anterior tenemos:

$$b = \frac{1}{1 - \frac{\alpha^0 (2 - 3\alpha^0)}{\alpha (2 - 3\alpha)}} \quad \text{---- (19)}$$

lo que demuestra que  $b$  es una función única de  $\alpha$ . La figura III.6 también muestra la curva  $b$  vs.  $\alpha$ .

Ahora se puede calcular el tiempo que tarda una partícula en pasar a través del extrusor. Si la longitud axial de un tornillo es  $L$  y  $v_\lambda$  es el componente de la velocidad en esa dirección, entonces:

$$t = \frac{L}{v_\lambda} \quad \text{---- (20)}$$

donde  $v_\lambda$  es la velocidad promedio de una partícula en la dirección axial.

Cuando la partícula esta en la parte baja del canal, su posición es  $a$  y su velocidad es  $v_\lambda$ . Cuando esta en la parte superior su posición es  $a^0$  y la velocidad es  $v_\lambda^0$ . Siendo que la fracción de tiempo que esta en la parte superior del canal es  $b$ , entonces la velocidad media es:

$$\bar{v}_\lambda = v_\lambda(1-b)v_\lambda^0 b \quad \text{---- (21)}$$

El componente  $\lambda$  de la velocidad es:

$$v_\lambda = 3V\alpha(1-\alpha)(1-\phi) \sin \theta \cos \theta \quad \text{---- (22)}$$

donde  $\phi$  representa la relación de presión de flujo y la resistencia del flujo. Si se combinan las 3 ecuaciones anteriores, obtenemos:

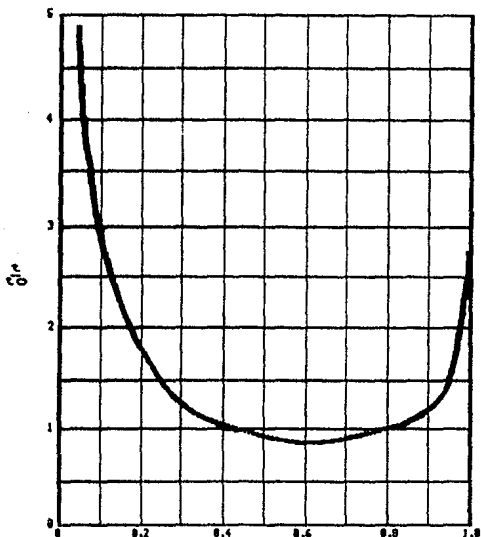
$$t = \frac{L}{3V(1-\phi)\cos\theta \sin\theta [\alpha(1-\alpha) + b(\alpha^0 - \alpha)(1-\alpha - \alpha^0)]} \quad \text{---- (23)}$$

Aquí se ve que las partículas que inicialmente estan cerca del centro del canal realizan un viaje mas rápido a través del extrusor. El tiempo de residencia mínimo ocurre cuando  $a = \alpha$ .

Para el caso especial donde  $\phi = 0$  (no hay presión de flujo) y  $a = \alpha$ , la ecuación (23) se reduce a  $(3Z / 2Vz)$ . El tiempo relativo de residencia, definido como  $(t/t^0)$ , donde  $t$  es el tiempo en que una partícula en posición  $a = \alpha$  atraviesa, se grafica en la figura (III.7) como una función de  $a$ . Debe notarse que hay una región bastante amplia en el centro del canal, donde el tiempo de residencia es prácticamente constante. De todos modos al irse acercando a la parte superior o inferior del canal el tiempo de residencia se incrementa rápidamente. En los extremos comienza a hacerse infinito. Como las partículas que estan en los extremos cambian continuamente de posición con las partículas de la nueva capa de fluido, todas las partículas pasarán a través del



extrusor, aunque aquellas que se encuentran en la raíz del tornillo, tardarán un tiempo considerable para lograrlo.



**FIG. III.7. Tiempo relativo de residencia como una función de la posición inicial.**

Por otro lado, el esfuerzo cortante comienza a ser muy grande para tornillos largos con canales poco profundos. Para cualquier tornillo puede hacerse mas grande si se incrementa la relación de presión y resistencia de flujo, es decir reduciéndose drásticamente la salida. También el esfuerzo cortante aumenta en tornillos con pequeños

ángulos de hélice y para aquellos con ángulos muy grandes ya que la eficiencia de bombeo disminuye considerablemente en esos extremos. No todos los elementos del fluido se ven afectados por el esfuerzo de la misma manera, ya que el esfuerzo y es función de la posición del elemento.

Los experimentos de mezclados de Maddock (14) confirman, cualitativamente las siguientes conclusiones sobre el análisis anterior:

1. Los tornillos con canales poco profundos son mezcladores mas efectivos que aquellos con canales profundos.

2. La circulación de agua de enfriamiento a través del tornillo mejora el mezclado. Esto reduce la profundidad efectiva del canal y por lo tanto se explica bajo las mismas bases que el punto 1.

3. El incremento de la presión a velocidad constante del tornillo mejora la acción mezcladora del tornillo.

4. El incremento de la presión a velocidad constante de extrusión mejora la acción de mezclado del tornillo, pero no tanto como cuando se aumenta en igual forma la presión a velocidad constante del tornillo. Si la velocidad de extrusión es constante, la velocidad del tornillo debe aumentar.

### **3.3 CONCLUSIONES.**

---

Como se puede observar, por lo anteriormente expuesto, el mezclado resulta ser una operación compleja que juega un papel importante al hablar de la incorporación de cargas minerales a los polímeros.

Se ha mencionado también que la textura de la mezcla al igual que la uniformidad total resultan factores muy importantes, dependiendo del uso que se le vaya a dar al producto final.

En algunos casos no resulta difícil obtener la textura y la uniformidad deseadas, sin embargo hay casos en los cuales esto representa un grave problema.

Se ha visto que se requieren ciertas condiciones especiales para obtener el tipo de mezcla deseada en el caso específico que nos interesa y en realidad no se llegan a obtener resultados óptimos.

Para determinar el grado de mezclado es necesario recurrir a métodos estadísticos, lo cual en la práctica resulta un tanto engorroso.

Se habla de mezcla laminar simple en el caso específico de los polímeros ya que, debido a su alta viscosidad, no es posible crear turbulencia.

Si fuese posible tener un flujo turbulento, el mezclado sería mucho más rápido de obtener pues la velocidad sería mayor, sin embargo, como se trata de flujo laminar, la velocidad de mezclado es inherentemente menor, lo que representa más tiempo y mayor dificultad para lograr un buen mezclado.

Como se puede ver en la figura III.4, el mezclado laminar depende de la orientación inicial de los componentes y del esfuerzo cortante, lo que significa otra limitante en el proceso ya que al no estar inicialmente orientada la carga en la forma correcta, el mezclado no se lleva a cabo adecuadamente.

También se debe tomar en cuenta el tiempo de residencia y la velocidad de las partículas dentro del extrusor, ya que si alguno de los dos no es el suficiente, el mezclado tampoco se realizará homogéneamente.

Por su parte el esfuerzo cortante que actúe sobre cada elemento, que depende de la posición del mismo, determina las profundidades necesarias en los canales del tornillo.

Por estas y otras razones ya enunciadas con anterioridad podemos concluir que uno de los efectos importantes de la incorporación de un titanato al polímero es el de evitar los problemas de mezclado, ya que, al adicionar la mezcla titanato/carga mineral al polímero se formará un complejo organometálico, lo que conlleva la eliminación del mezclado dentro del extrusor, puesto que se ha realizado ya una reacción química entre los elementos al ser mezclados previamente.

## **IV. EXPERIMENTOS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL TITANATO MAS ADECUADO PARA LA INCORPORACION DEL MAYOR PORCENTAJE DE CARGAS MINERALES.**

### **4.1 INTRODUCCION.**

---

Ya que el objetivo de la tesis es incorporar al polietileno hasta el 50 % o mas de agentes minerales, se describirán los experimentos que se hicieron con diferentes agentes de acoplamiento (titanatos), con diferentes minerales ( carbonato de calcio, sílice, sulfato de bario, etc. ) y con diferentes resinas de polietileno de baja densidad y de alta densidad, aún cuando el método es adecuado también para otros materiales plásticos como el PVC o los hules sintéticos.

La proporción de agente de acoplamiento en la mezcla se varió del 0.5 % hasta el 5 % en peso y como es lógico suponer, para que el método de buenos resultados se requiere una homogeneización perfecta entre el agente de acoplamiento , el mineral y el polietileno, por ello primeramente se describen las experiencias efectuadas en el laboratorio y en la planta piloto para conseguir la homogeneización de la mezcla de sólidos.

Como ya se dijo, de los diversos titanatos comerciales manufacturados por la compañía KENRICH PETROCHEMICAL, que se utilizaron en las pruebas, solamente tres de ellos nos permitieron obtener resultados altamente satisfactorios al ser combinados con resinas poliméricas de polietileno y cargas minerales de procedencia nacional.

Dichos titanatos fueron:

- KR TTS Titanato isopropil triisosteárico
- KR 38BS Titanato isopropil triculmilfenilo
- KR 58CS Titanato isopropil octil-butil-pirofosfato

Al realizar las pruebas en el laboratorio, todos los titanatos, mezclados con resinas, plastificantes y cargas minerales manufacturados en E.U.A. dieron excelentes resultados, sin embargo, por razones obvias de costo y suministro no fueron seleccionados para la realización del trabajo.

Para las pruebas de laboratorio se utilizó un mezclador Banbury marca Farrel-Birmingham Co. modelo 11, el cual se operó a 20 r.p.m., consumiendo 250 HP y entregando 28 litros cada 10 minutos (  $9 \text{ ft}^3/10 \text{ min.}$  ).

Con el Banbury se hizo una mezcla del tipo " master batch " entre el polietileno y el titanato, esta mezcla se molió en un Cumberland obteniéndose un polvo.

Con un Henshel modelo XAT-20 se mezcló en fase sólida el polvo salido del Cumberland con la carga mineral que se pretende incorporar al material plástico.

Al realizar las mezclas se manejaron las siguientes variantes en las composiciones:

1. Se probaron 3 diferentes titanatos (antes mencionados)
2. Se probaron los siguientes minerales:
  - a) Carbonato de calcio como talco
  - b) Sulfato de bario
  - c) Silicato de aluminio
  - d) Sílice

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

e) Meta silicato de calcio

3. Se probaron los siguientes tipos de PEBD:

- a) 17070L
- b) 20020X PEMEX
- c) 20020P

4. Se probaron los siguientes tipos de PEAD:

- a) Gulf 90D
- b) Marlex HD-1
- c) Petrothene 409-2

## 4.2 DESCRIPCION DE UN EXPERIMENTO MUESTRA DE UN TITANATO Y UNA RESINA POLIMERICA.

### 4.2.1 TITANATO ISOPROPIL TRIISOESTEARICO

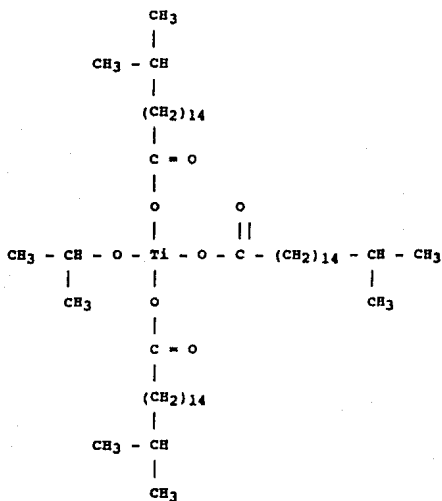
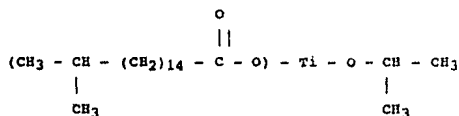


Fig. IV.1 Titanato isopropil triisoestearico.

Es un éster con un solo término funcional (monofuncional)



## 4.2.2 ESTRUCTURA QUIMICA.

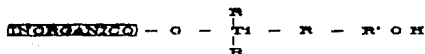
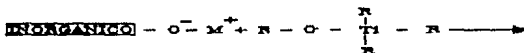


## 4.2.3 PROPIEDADES FISICAS.

Gravedad específica a 23.3° C.	0.944
Punto de inflamación	157.2° C
Viscosidad, $\mu$ , a 23.3° C, cps	120
Punto de vuelado	-15° C
Punto de descomposición	204.4° C
Apariencia	Líquido oleoso rojizo.

## 4.2.4 MECANISMO.

### 4.2.5 PROCESO.



Como los reactivos KEN-REACT TTS reaccionan "in situ" para convertir el material inorgánico en un complejo orgánico, se deben de adicionar lo mas pronto posible a la matriz para permitir que se lleven a cabo el calor y tiempo de reacción. Si el proceso no permite tiempo suficiente de interacción, la carga mineral en cuestión debe ser premezclada con el KEN-REACT TTS en un medio hidrocarbónico (aceite

debe ser premezclada con el KEN-REACT TTS en un medio hidrocarbónico (aceite o polímero) y luego mezclado dentro del sistema. No debe ser adicionado a la carga mineral en seco antes de ser mezclado.

El rango de requerimiento del KR-TTS varía desde 0.5 a 5% en el contenido de la carga mineral. La cantidad exacta depende de las condiciones de proceso y de las propiedades finales deseadas.

### **4.3 ANTECEDENTES TEORICOS.**

Hasta hace poco tiempo, la energía y la carga mineral eran dos de los términos menos considerados en la formulación de polímeros. Hoy en día los científicos deben considerar cualquier recurso para alcanzar propiedades finales eficientemente. Es por esto que se han intensificado las investigaciones en la extensión y reforzamiento de poliolefinas termoplásticas y caucho, vía carga mineral, en un esfuerzo para detener el aumento en los precios y la baja disponibilidad de polímeros.

La incorporación de un rellente o carga mineral en una poliolefina termoplástica, por lo general trae como resultado un incremento en el módulo tensil y un descenso en la resistencia al impacto. Cuando los rellentes o cargas exceden el 20% del polímero, la elongación y la resistencia al impacto se ven adversamente afectadas.

Varias teorías se han postulado para explicar el fenómeno de tensión de los rellentes o cargas que ocurre en el estado macromolecular usando compuestos minerales con técnicas convencionales.

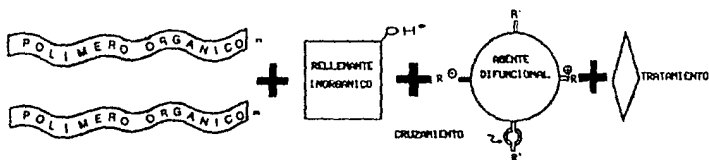
1. La tensión impartida al compuesto ocurre en la fase orgánica (polímero) independientemente de la fase mineral.
2. La tensión impartida al compuesto ocurre en igual forma en la matriz polimérica y en la fase mineral. Si la fuerza tensil de la fase mineral es mayor

que aquella en la fase orgánica la fuerza del compuesto se incrementará proporcionalmente a la carga mineral rellenanante.

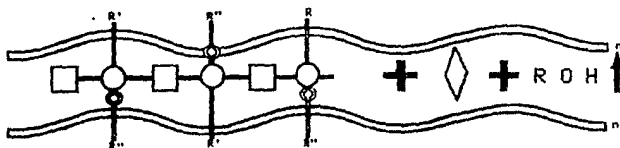
3. La tensión impartida al compuesto es transferida de la matriz polimérica a la fase mineral rellenanante, de la misma forma del agente mineral a la propia partícula. En cargas mayores al 20% la distancia media entre las partículas de rellenanante es del mismo orden de magnitud que las dimensiones de la partícula de rellenanante. Las propiedades físicas empobrecidas son resultado únicamente del "stress", fallas o quebras en un debilitamiento de la interfase entre la matriz del polímero y la fase rellenanante (17).

Es por esto que la meta de las investigaciones científicas es eliminar o minimizar las distintas "fases" que se presentan entre el rellenanante inorgánico y el polímero orgánico. Esto ha conducido a nueva tecnología que ha resultado exitosa en la unión química de la fase mineral rellenanante con la matriz polimérica orgánica en sistemas tratados. Estos agentes de enlace anulan la incompatibilidad intrínseca de los materiales inorgánicos en medio orgánico atacando los sustituyentes organo-funcionales de la superficie del rellenanante y a la "nervadura" orgánica por medio de una reacción interfacial que se ilustra de la siguiente manera:

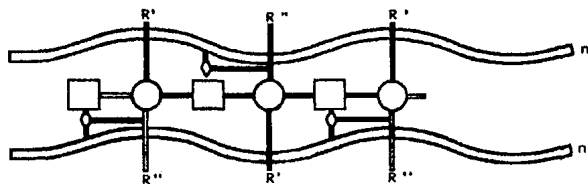
#### PASO UNO : (INGREDIENTES)



#### PASO DOS : (MEZCLA)



### PASO TRES : (TRATAMIENTO)



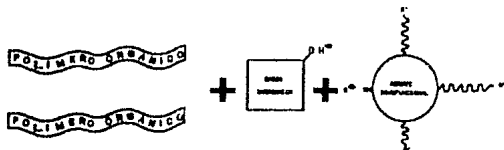
De aquí que el material inorgánico inicial cuando es tratado con agente de enlace se convierte en un rellente mineral con apéndices orgánicos, lo que nos da los siguientes cambios en las propiedades de la carga mineral:

- Organofilia e hidrofobia en vez de organofobia e hidrofilia
- Mejoramiento de la compatibilidad y de la dispersión
- Disponibilidad de los apéndices orgánicos del rellente para entremezclarse con la matriz orgánica y proveer una cadena molecular para transferir la energía de "stress" de la matriz del polímero a la fase del rellente sin ruptura en la cadena en polímeros termoplásticos
- Disponibilidad de los apéndices orgánicos del rellente para entrar dentro del mecanismo de cruzamiento de eslabones en la termosellabilidad polimérica

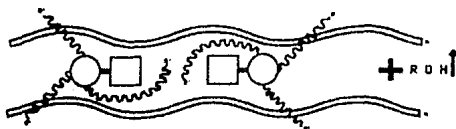
Lo que se necesita para superar las limitaciones de estos rellentes, es una molécula de agente diseñada específicamente para ser monofuncional en vez de polifuncional y que contenga una larga cadena de carbono que pueda formar una capa monomolecular alrededor del rellente y entremezclarse con la matriz orgánica.

Esto se ilustra de la siguiente manera:

PASO UNO : (INGREDIENTES)



PASO DOS : (MEZCLADO)



Utilizando los agentes monofuncionales en compuestos poliméricos o monoméricos orgánicos, da como resultado las siguientes ventajas adicionales:

- La reología del compuesto (termoviscosidad) se reduce dramáticamente debido a la baja energía superficial del rellenanante.
- Los tiempos de mezclado y el consumo de energía son reducidos en gran medida.
- Es posible incorporar una mayor proporción de rellenanante en el compuesto orgánico, que con rellenanantes no tratados.
- Son posibles nuevas técnicas de mezclado en sistemas líquidos y en polvo.
- Mejora en las propiedades físicas.

#### 4.4 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD CARGADO.

El titanato isopropil triisosteárico, KEN-REACT TTS que es un éster, es un agente monofuncional, que fue utilizado para estudiar el efecto de las propiedades de

impacto, tensión e índice de fusión, entre otras, de PEAD (grado de inyección) que contenía rellenos con una carga que estaba entre los límites de 30 y 60% como se muestra en la siguiente Tabla:

BATCH No	QUILIBRO PEAD	KEN-REACT TTS	BaSO4	ASP-100CLAY SODIATO AJ
1	70	0	30	-
2	69.1	0.9	30	-
3	58.8	1.2	40	-
4	48.5	1.5	50	-
5	38.2	1.8	60	-
6	70	0	-	30
7	69.1	0.9	-	30
8	58	1.2	-	40
9	48.5	1.5	-	50
10	38.2	1.8	-	60
11	70	0	-	-
12	69.1	0.9	-	-
13	58.8	1.2	-	-
14	48.5	1.5	-	-
15	38.2	1.8	-	-
16	70	0	-	-
17	69.1	0.9	-	-
18	58.8	1.2	-	-
19	48.5	1.5	-	-
20	38.2	1.8	-	-

**Tabla IV.1 Formulaciones para composiciones de relleno de PEAD**

BATCH No.	FE-1 WOLLASTONITA META SILICATO DE CA	CAMELTEX CaCO3
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	-	-
7	-	-
8	-	-
9	-	-
10	-	-
11	30	-
12	30	-
13	40	-
14	50	-
15	60	-
16	-	30
17	-	30
18	-	40
19	-	50
20	-	60

**Tabla IV.1 Formulaciones para composiciones de rellenan-  
te-PEAD (Continuación).**

Los compuestos fueron hechos inicialmente con un 30% de rellenan- te sin agente y después se hicieron corridas a 30, 40, 50 y 60% , manteniendo constante un 3% por peso de agente, basado en el rellenan- te. Como la técnica de mezclado es importante para obtener los beneficios completos en la reacción "in situ" entre el rellenan- te y el agente. Se utilizó un Banbury de laboratorio para producir el "master batch" con el KR-TTS y el PEAD Gulf 90D a una concentración de 5%. El compuesto de PEAD

90D/TTS fue entonces tratado en un molino Cumberland, utilizando una pantalla malla 14. El polvo de "master batch" PEAD 90D/TTS fue mezclado en seco en un Henschel con cada rellanante para dar las reacciones rellanante/TTS enlistadas en la Tabla IV.1. La mezcla seca fue entonces incorporada con mas PEAD 90D para obtener el porcentaje de rellanante deseado usando el Banbury en un ciclo de 3 minutos, 4.082 atm de presión y una temperatura de burbuja de 93.33° C.

Los compuestos finales fueron otra vez molidos y moldeados por inyección en placas de dimensiones de 0.267 x 1.27 x 6.033 cm. para pruebas. Las condiciones de moldeo fueron:

Temperatura del perfil	204.4° C
Presión de inyección	68.03 atm
Velocidad de aceleración	10 segundos
Tiempo de moldeo	15 segundos

Las propiedades resultantes se sintetizan en la Tabla IV.2.



		% de carga	% de TTS	Indice de Fluides gra/10 min.
Control	0	0	0	19.67
BaSO <sub>4</sub>	1	30	0	20.76
	2	30	3	22.01
	3	40	3	22.32
	4	50	3	22.34
	5	60	3	22.02
ASP-100	6	30	0	14.04
	7	30	3	12.94
	8	40	3	8.44
	9	50	3	1.50
	10	60	3	0
Wollastonita	11	30	0	16.49
	12	30	3	16.47
	13	40	3	16.53
	14	50	3	14.94
	15	60	3	12.03
CaCO <sub>3</sub>	16	30	0	16.31
	17	30	3	18.83
	18	40	3	18.42
	19	50	3	17.71
	20	60	3	17.81

**TABLA IV.2 Efectos del TTS en las propiedades del PEAD cargado con compuestos minerales.**

Código	Reserva Mineral (toneladas)	Monto total (USD) (1970-72)	Importe (USD) (1970-72a)
0	2050	98,000	0.926
1	2432	81,722	0.584
2	2462	49,033	0.604
3	2218	59,434	0.640
4	2059	63,269	0.764
5	1785	70,049	0.910
6	2510	99,785	0.402
7	3020	133,152	0.605
8	2785	140,096	0.528
9	2490	145,285	0.452
10	2353	150,873	0.374
11	2334	72,185	0.563
12	2235	87,171	0.772
13	2019	106,018	0.814
14	1802	121,270	0.884
15	1608	130,756	0.926
16	1961	217,927	0.531
17	2334	180,552	0.572
18	1725	163,445	0.785
19	1765	150,875	0.967
20	1804	130,756	1.014

**TABLA IV.2 Efectos del TTS en las propiedades del PEAD cargado con compuestos minerales. (Continuación)**

#### 4.5 PELICULA SOPLADA DE PEBD CARGADO CON $\text{CaCO}_3$ .

Los efectos en la energía y dispersión se compararon mediante un estudio entre agentes de mezclado convencionales y el agente TTS en película soplada de PEBD cargada con  $\text{CaCO}_3$ .

Las muestras fueron preparadas en un Brabender conectado eléctricamente, donde la resina de PEBD, el pigmento y el agente humectante fueron cargados a la vez dentro de la cámara mezclante.

La velocidad del rotor fue 82 r.p.m., el perfil de temperatura fue de 93.33° C. Las lecturas del par en  $\text{g/m}^3$  fueron hechas cada 30 segundos durante 3 minutos empezando con una lectura inicial a los 30 segundos de tiempo transcurrido. El compuesto resultante fue enfriado y molido en un molino Wiley utilizando una pantalla malla 60. El compuesto seco fue mezclado en seco con polietileno grado película de baja densidad con índice de fluidez 2 y alta claridad, a razón de 9:1. La película soplada de 1.5 mm de espesor fue producida de la mezcla seca en un extrusor de 3.81 cm, la relación de soplado de 2.5 : 1 con un perfil de temperatura de 143.33 a 160° C. La película de 1.5 mm resultante fue examinada por el número de partículas de pigmento no dispersadas en cada  $46.50 \text{ m}^2$  de película. Los resultados se presentan en la Tabla IV.3.

FORMULA								
Carbonato de calcio (Camel-Tex) = 70%								
LD-501 = 2%								
Aditivo = 2%								
Aditivo	Lectura del torque (gram <sup>2</sup> )						Indice de deformación	Particulas en 930 cm <sup>2</sup>
	Tiempo (segundos)							
	30	60	90	120	150	180		
Control	2000	2000	1900	1750	1750	1750	0.27	312
Monosteato de glicerol	2150	1400	1300	1250	1250	1150	3.87	8
Estearato de aluminio	1900	1400	1300	1250	1250	1250	1.60	32
Estearato de cinc	1900	1650	1400	1150	1150	1050	2.30	44
KR-TTS	1250	900		900	750	750	4.17	16

TABLA IV.3. Dispersibilidad de CaCO<sub>3</sub> en PEAD.

#### 4.6 DISCUSION DE LOS RESULTADOS.

Examinando la tabla IV.2 se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El KR-TTS trabaja mas eficientemente con CaCO<sub>3</sub> y BaSO<sub>4</sub>, que con Meta-Silicato de calcio (P-1) y Silicato de aluminio (ASP-100).
2. Los sistemas 30/70 rellenanates - PEAD con KR-TTS tienen mejor resistencia al impacto que los sistemas equivalentes sin KR-TTS.
3. Los sistemas al 40% carga mineral/PEAD conteniendo CaCO<sub>3</sub>, Meta-Silicato de calcio y BaSO<sub>4</sub> tienen igual o mejor resistencia al impacto que el PEAD 100% puro.
4. El módulo de tensión del PEAD cargado con CaCO<sub>3</sub> se reduce significativamente con 3% de KR-TTS. Sorpresivamente disminuye al aumentar la carga. A pesar de que el módulo de tensión es reducido significativamente, la fuerza de tensión se mantiene relativamente constante con cargas tan grandes como de 60%.

5. El índice de fluidez del PEAD cargado con  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{BaSO}_4$ , se mantiene razonablemente constante. Con cargas del 60% tiene características de flujo similares al PEAD virgen, sin carga.

Examinando la Tabla IV.3 se concluye:

6. Los sistemas de  $\text{CaCO}_3$  / PEAD tratados con KR-TTS reflejan una disminución instantánea del TORQUE y ciclos mas cortos del mezclado para optimización. La dispersión es excelente con solo el 33% de la potencia requerida normalmente cuando se compara con sistemas convencionales.

#### **4.7 CONCLUSION.**

---

El KR-TTS es mas efectivo cuando la carga es  $\text{CaCO}_3$ . El compuesto puede estar formado por 45.40 kg. de PEAD y relleno con 71.4 kg. de  $\text{CaCO}_3$  y obtener propiedades esencialmente equivalentes a las del PEAD no relleno.

Estas propiedades son obtenidas con una reducción de energía significativa y no pueden ser obtenidas sin el tratamiento con el agente KR-TTS.

#### **4.8 DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE AGENTE DE UNION USADO.**

---

Se dispersaron cantidades variables de TTS en  $\text{TiO}_2$  utilizando la técnica de película soplada de PEBD, con el objeto de determinar el porcentaje de TTS en cargas inorgánicas necesario.

Los resultados se muestran en la Tabla IV.4.

FORMULA								
RCL-9 TiO <sub>2</sub> = 75%								
LD-501 = 21-25%								
KR-TTS = 0- 4%								
CONDICIONES								
Temperatura de Mezclado 93 C								
Presión Ram 5 Kg peso								
Velocidad del rotor 82 R.P.M.								
Tiempo total del ciclo 180 segundos								
KR-TTS	Lectura del Torque (grm-m <sup>2</sup> )						Índice de fluidez	Partículas en 800 cm <sup>2</sup>
	Tiempo (segundos)							
	30	60	90	120	150	180		
0.0	2250	2750	1250	1250	1150	1100	0.00	600
1.0	2250	1750	1250	1250	1100	1100	0.72	200
2.0	1250	1000	850	800	800	800	2.20	100
3.0	1250	900	900	900	750	750	3.10	63
4.0	1750	1000	750	750	700	700	3.20	58

#### 4.8.1 CONCLUSION.

Con un porcentaje del 2 al 3 % de KR-TTS obtenemos la mejor combinación en cuanto a economía y propiedades.

## V. SELECCION DEL EQUIPO DE MEZCLADO PARA PRODUCIR PELICULAS DE POLIETILENO CON DISTINTAS CARGAS MINERALES, EMPLEANDO EL TITANATO ADECUADO.

### 5.1 EXTRUSION.

---

La palabra extrusión proviene del latín EXTRUDERE, forzar. Operación que consiste en forzar una masa de materia plástica a través de una matriz (dado) para que tome la forma adecuada.

La extrusión es el proceso mediante el cual la materia prima termoplástica en forma de partícula es calentada y posteriormente forzada, ya como mezcla del polímero deseado, a pasar a través de un dado para darle la forma deseada. Esta operación continúa produce películas sopladas y fundidas, hojas rígidas y espumadas, tubos, tuberías, varilla, fibras y varios perfiles. El proceso también es utilizado para cubrir o laminar papel y otros sustratos, para proteger alambre y para combinar y pelletizar (granular) el material crudo.

La operación de extrusión se lleva a cabo en un extrusor cuya función es proporcionar un material plastificado, térmicamente homogéneo, a velocidad constante.

Un extrusor utiliza un tornillo espiral que está dentro de un cilindro o barril que es calentado. Los gránulos o granalla de polímero son alimentados por una tolva hacia el barril donde son calentados y conducidos hacia adelante por el tornillo en un rango controlado de presión y temperatura, para que el material fundido uniformemente sea

forzado a pasar a través del dado y así obtener el producto deseado. Por el método de extrusión se procesa la mayor parte del polietileno.

## **5.2 ELEMENTOS DE UN EXTRUSOR.**

---

Existen varios tipos de extrusores. El mas usual es el que consta de un solo tornillo o gusano helicoidal, llamado husillo, que se encuentra dentro de un cilindro provisto de sistemas de calentamiento, enfriamiento y control de temperatura. Dicho tornillo gira dentro del cilindro, movido por un motor a través de un reductor de velocidad y tiene tres funciones:

- a) Transportar el polímero
- b) Plastificarlo
- c) Dosificarlo a través de un cabezal

Un extrusor se divide en 3 zonas:

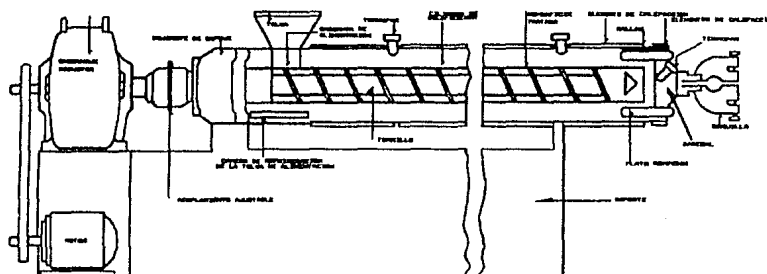
- 1) Alimentación
- 2) Compresión
- 3) Dosificación

En la zona de alimentación se recibe el polímero en una tolva, aumentándole la presión a la resina conforme avanza a la zona de compresión, en la que se continúa aumentando la presión y los gránulos de polímero se convierten en una masa completamente plastificada de temperatura uniforme.

La zona de dosificación tiene como finalidad regular el flujo de material plastificado, del cabezal al dado.



Los extrusores de un tornillo diseñados para procesar termoplásticos están normalmente dentro de un rango que va desde menos de una pulgada hasta 12 pulgadas de diámetro interno del barril, siendo que la mayoría de las máquinas de producción entran en el rango de 2 a 8 pulgadas Fig. V.1. La longitud del barril o canal se divide entre el diámetro y así se expresa la relación  $L/D$  que es característica para describir al extrusor. La longitud del barril es determinada por el polímero que se va a procesar y por la relación de producción deseada.



**FIG. V.1. Principales elementos de un extrusor.**

El barril está hecho de acero de alta resistencia y es construido para soportar presiones desde 7,500 hasta 10,000 psi. El diámetro interno del barril es protegido con nitruros o bien con forros especiales. Las tapas de los tramos de conducción son

resistentes a la flama pues están protegidos con nitruros o con recubrimientos de aleaciones especiales, todo esto con el fin de reducir el desgaste.

En el caso de extrusores plastificantes, el polímero a alimentar debe estar en forma de talco, hojuelas, gránulos (pellets), perlas o bien una combinación de todos estos. El extrusor conduce, mezcla, funde y bombea el polímero contra el dado a una determinada presión.

La configuración del dado y el proceso de solidificación o enfriado son determinados por la forma final deseada para el producto.

Se pueden utilizar métodos eléctricos de calentamiento o bien por medio de fluidos. En el caso de calentamiento eléctrico los elementos de calentamiento son del tipo Calrod que están fundidos en aluminio y atados al barril. Los tubos de enfriamiento por lo general están fundidos en la misma pieza de aluminio que contiene los elementos de calentamiento. Algunos barriles están contruidos con chaquetas a través de las cuales circula un líquido ya sea de calentamiento o de enfriamiento. Los barriles con agua de enfriamiento son utilizados para tener un control preciso sobre la temperatura de fusión y maximizar así la salida. Los barriles enfriados por aire son utilizados cuando el requerimiento de calor es mínimo.

Los barriles se dividen en zonas, cada una de las cuales es controlada mediante controladores de temperatura específicos o por microprocesador. Los termopares son usados para captar la temperatura y enviar señales a los tableros de control.

El mecanismo de manejo para mover el tornillo consta de un motor eléctrico y un reductor de engranes. El motor por lo general es de velocidad variable, de corriente alterna o directa con la capacidad de trabajar encima de un rango de operación de 20 % de lento a rápido. El reductor de engranes es utilizado para reducir la velocidad de salida del motor de 1750 r.p.m. a la velocidad requerida por el tornillo y para aplicar

el torque necesario a esa velocidad. La mayoría de los extrusores trabajan en un rango de velocidad de 200 r.p.m. La velocidad del tornillo depende del diámetro del extrusor, del polímero a extruir y de la relación de producción deseada. La calidad de la mezcla fundida es el factor limitante para el tamaño del extrusor. La calidad depende de la velocidad del tornillo, es decir, a mayor velocidad menor calidad, ya que la uniformidad de la mezcla disminuye o bien puede ocurrir una posible degradación del polímero por exceso de calor por fricción.

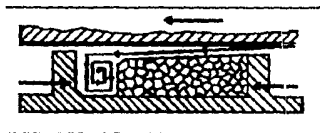
El tornillo puede considerarse como el corazón del proceso de extrusión. Utiliza canales helicoidales y la profundidad del canal varía para acoplar así funciones múltiples como conducción, compactación, fusión, mezclado y bombeo. El tornillo común está dividido en 3 secciones:

1. Una sección de alimentación donde la profundidad del canal es relativamente grande.
2. Una sección de transición o compresión donde disminuye la profundidad del canal y,
3. Una sección de dosificación o bombeo donde la profundidad del canal decrece aún más.

Dependiendo del polímero que va a ser procesado, el tornillo puede incluir tramos con barreras y/o secciones de mezclado, para mejorar la eficiencia en la fusión y la homogeneización de la mezcla que va a ser extruída.

La conducción de sólidos en la sección de alimentación se lleva a cabo por fricción entre los sólidos y las superficies del barril y el tornillo. Posteriormente toma lugar la compactación en la sección de transición. La fusión en el tornillo por lo general comienza en la sección de alimentación, continuando en la sección de transición y en la de dosificación. El principio y fin de la fusión y el mecanismo de fusión dependen de muchos factores tales como el tipo de resina utilizado, la forma de alimentación (pellets, granalla, masa esponjosa, etc.), del diseño del tornillo, del perfil del barril y de la relación de salida. La fusión en el tornillo es el resultado de dos mecanismos, de la fuerza cortante de disipación de la energía mecánica debida a la rotación del tornillo

y del calor conducido por el calentamiento del barril. Un diagrama esquemático describiendo el mecanismo de fusión en el canal del tornillo es mostrado en la figura V.2.



**FIG. V.2. Mecanismo de fusión del polímero en el tornillo.**

### **5.3 FUNCIONAMIENTO DEL EXTRUSOR.**

En un extrusor convencional de un solo tornillo, el polímero transportado guardará 3 estados; el primero como partículas sólidas, después como una mezcla de plástico fundido con partículas sólidas y finalmente como una mezcla totalmente plastificada.

Los gránulos de polímero pasan, por gravedad, desde la tolva hasta la garganta del cilindro, contactan con el tornillo que gira dentro del cilindro y estos son transportados hacia adelante por el movimiento relativo entre la rotación del tornillo y el cilindro, a la vez son calentados por las resistencias eléctricas a través de la superficie del cilindro, transformándose en una masa fundida homogénea que pasa después por un paquete de mallas, para detener las impurezas y aumentar la contrapresión en la superficie interior del cilindro.

El espesor final de la película depende de la viscosidad del material fundido y de la presión con la cual este material se alimenta al dado. Manteniendo la viscosidad del material fundido uniforme se obtiene una presión y una velocidad de alimentación constante. La velocidad de rotación del tornillo es determinada por la potencia del motor empleado y por el reductor de velocidad acoplado a este y debe ser tal que conduzca y funda el material. La velocidad de giro del tornillo debe mantenerse constante.

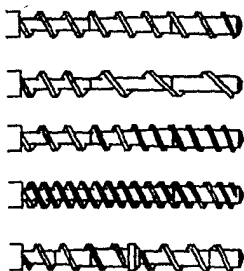
El extrusor va montado sobre rieles para acercarlo o alejarlo de la línea de laminación.

#### **5.4 DISEÑO DEL TORNILLO.**

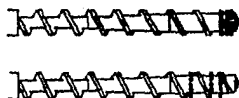
---

Una gran variedad de tornillos son usados hoy en día para producir plástico fundido para una multitud de productos finales. El incremento en las velocidades de salida, el perfeccionamiento en la calidad del fundido, polímeros más sofisticados y mejores características para uso de los tornillos han creado la demanda de diseños innovadores.

Hay tipos de tornillos que utilizan tramos simples, dobles con diferentes configuraciones, paso doble, tornillos-tapón, tornillos de mezclado y barreras. Ejemplos de tornillos comunes presentando tramos de configuración de raíz son mostrados en la figura V.3



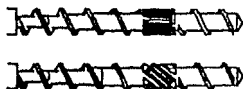
**FIG. V.3 Diseños de tornillos.**



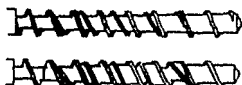
**FIG. V.4. Tornillos mezcladores de un solo paso.**

Los tornillos típicos de mezclado son mostrados en la figura V.4.

Tornillos con sección de barreras se muestran en las figuras V.5 y V.6.



**FIG. V.5. Tornillos con cortas secciones de barrera. A) Barrera tipo UCC B) Barrera tipo EGAN**



**FIG. V.6. Tornillos con secciones largas de barrera . A) Con ángulo de hélice cambiante. B) Con profundidad de canal cambiante.**

Las secciones con barrera y mezclado adicionan mezclado y fusión y permiten diseñar canales más profundos para obtener velocidades mayores de salida con una calidad aceptable de fusión.

La demanda de tornillos con largas secciones de barrera aumenta, ya que mejoran la relación de fundido y previenen la formación de lechos sólidos de resina no fundida ya que la rompen antes de que se complete la fusión.

#### **5.4.1 EXTRUSORES CON MULTIPLES TORNILLOS.**

Los extrusores con múltiples tornillos son utilizados para resinas compuestas de materiales sensibles al calor, para materiales difíciles de alimentar (como talcos), para procesos reactivos y para materiales volátiles.

Los tornillos dobles pueden tener varias configuraciones de diseño para llevar a cabo la variación de los grados de corte usando bloques amasantes bilobulados o trilobulados que funden, cortan y mezclan. Los pigmentos, aditivos y los materiales de relleno pueden ser dispersados y distribuidos utilizando extrusores de tornillos dobles (COROTATING TWIN SCREW). Generalmente las máquinas con tornillos múltiples para aplicaciones compuestas tienen altos costos de reparación, pero sin embargo se obtiene un funcionamiento superior lo que resulta el factor de balance.

#### **5.4.2. MEZCLA DE COMPUESTOS.**

Este proceso de extrusión, media entre el mezclado y la dispersión de aditivos, pigmentos, estabilizadores, agentes reforzantes, inhibidores, agentes espumantes, auxiliares del proceso, etc., dentro del polímero fundido, el cual posteriormente es extruido a través del dado que tiene varios agujeros circulares para producir filamentos continuos. Estos filamentos son enfriados en baño de agua y son secados y cortados en longitudes adecuadas para formar pellets.

Los tornillos simples para mezclado son relativamente largos (la relación L/D va de 32:1 a 40:1) incluyendo 2 ó 3 etapas, generalmente con algunas secciones de barrera.

#### **5.4.3. RECUPERACION.**

La recuperación de los polímeros requiere un equipo especial ya que la alimentación al extrusor es en varias formas. Debido a que el volúmen y densidad de la mayoría de los pedazos de plástico usados disminuye, se utiliza por lo general un



extrusor de doble diámetro. La parte final de alimentación del tornillo tiene un diámetro mayor para obtener un mayor volumen para la alimentación completa. Esto ayuda a incrementar la relación de producción.

## **5.5 EXTRUSION DE TUBERIA Y PERFILES.**

---

Las tuberías y los perfiles son producidos por ambos extrusores ya sea de simple o doble tornillo.

Una línea común de tubería o perfil requiere un extrusor, un dado, un dispositivo de apresto, tanque de enfriamiento, un tirador y además un cortador o un dispositivo de enrollamiento.

Un dado para tubería debe tener un mandril interno que es enfriado para dar un buen control del diámetro y terminado de la superficie.

Los dados deben ser aerodinámicos para prevenir que se cuelgue el material y ser diseñados para viscoelasticidades características de cada polímero en particular.

## **5.6 EXTRUSION DE PELICULA.**

---

La película de polietileno puede fabricarse por extrusión como película plana o tubular, para ello debe cuidarse el enfriamiento del producto.

La película extruida es flexible y normalmente tiene un espesor menor de 0.01 pulgadas. Los procesos de extrusión para ambas películas, planas (fundidas) y tubulares (sopladas), son similares pero los métodos para darles forma difieren.

### 5.6.1. PELICULA PLANA.

En la elaboración de la película plana se utiliza un dado diferente al empleado para la película tubular, ya que este es en forma de anillo y el de la película plana es recto.

La película plana es extruída verticalmente hacia abajo a través de un dado plano sobre un rodillo pulido y rotatorio, enfriado interiormente por agua. Las temperaturas a lo largo del rodillo enfriado no deben presentar entre sí diferencias mayores de 2 ó 3° C. El polímero fundido, hecho de forma de tejido plano, es por lo general conducido sobre varios rodillos enfriados en serie.

Un buen enfriamiento mejora las cualidades ópticas de la película, claridad, brillo y baja nebulosidad.

Para obtener una película de espesor uniforme, el dado debe tener tornillos de ajuste, a fin de controlar la abertura.

Los rodillos de enfriamiento tienen una cubierta delgada y deflectores espirales; son diseñados con doble pared para así extraer el calor más uniforme y efectivamente a través de toda la extensión de la película.

Debido a que éste método de enfriamiento de contacto es más rápido y más uniforme que los sistemas de enfriamiento con aire utilizados para la película tubular, la relación de producción de película plana es mayor. De hecho la película plana tiende a ser más limpia y con menor variación de espesor que la película tubular. La película producida por el proceso de fundido es utilizada en procesos de alta velocidad de conversión tales como laminación e impresión multicolor, al igual que en aplicaciones de empaques donde una alta claridad y brillo son deseables.



## 5.6.2. PELICULA TUBULAR.

En el proceso de película tubular el material plastificado se extruye a través de un dado anular, donde al salir se expande para formar una burbuja mediante la introducción de aire a presión a través del torpedo y finalmente es atrapada por unos rodillos a presión.

Después del dado, gracias a un anillo de enfriamiento con aire, la resina de polímero empieza a solidificar. Esta zona se conoce como línea de enfriamiento.

La extrusión vertical y hacia arriba es la más usual y conveniente. El diámetro de la burbuja es regulado por la cantidad de aire inyectado y gracias a esto se pueden obtener películas de diferente medida con el mismo dado.

El espesor de la película, que varía desde 0.0025 a 0.0075 cm. (calibre 100 a 300) para su uso en empaques por su buena transparencia, brillo y baja nebulosidad, hasta 0.02 cm. (calibre 800) para los usos industriales y agrícolas que requieren una alta resistencia al impacto y al rasgado, depende del gasto del extrusor, de la relación de soplado y de la intensidad del estirado o jalado de los rodillos.

Finalmente la película plegada se enrolla bajo tensión constante en un sistema de dos rodillos intercambiables.

El proceso de película tubular es el más popular, debido a la facilidad de fabricar bolsas con un sencillo equipo de sellado.

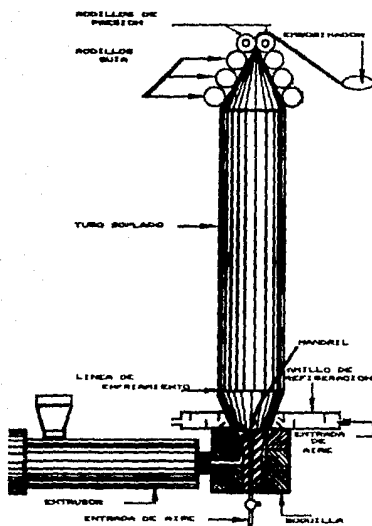


FIG.V.8. Extrusión de película soplada.

## 5.7 LAMINACION.

La laminación por extrusión consta de dos opciones:

1. La resina se extruye en forma de película directamente sobre uno de los sustratos y posteriormente se une al otro sustrato en los rodillos de combinación, se enfría y se embobina la lámina formada. Este caso se conoce como laminación por extrusión en caliente.

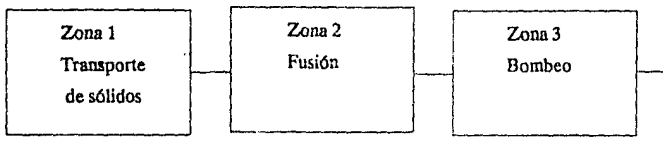
2. Hacer caer la resina extruída entre dos rodillos y antes de la combinación de esta película con el otro sustrato, se hace pasar la cara de la lámina que va a estar en contacto con el otro sustrato a través de un excitador electrónico, que produce una oxidación en la película, posteriormente se combina con el otro sustrato previamente cubierto con un promotor de adhesión, se enfría y se embobina la lámina formada. A este caso se le conoce como extrusión de baja temperatura.

## **5.8 EXTRUSORES PLASTIFICANTES.**

El extrusor plastificante es una de las mas versátiles máquinas utilizadas en el procesamiento de polímeros. Es esencialmente un tornillo-bomba al cual se alimenta polímero termoplástico sólido.

Además de funcionar como bomba, también funciona como conductor y fundidor y, en algunos casos, como intercambiador de calor, pero principalmente como mezclador y homogeneizador.

Se puede considerar al extrusor como un tornillo-bomba al cual se han adicionado un equipo para transportar sólidos y otro para fundir polímeros.



**FIG. V.9 Representación funcional de un extrusor plastificante.**

En la ZONA 1 el polímero es un sólido, en la ZONA 2 es un "fango muy blando" que consiste en la mezcla de polímero fundido y partículas sólidas y en la ZONA 3 está completamente fundido por lo que es un fluido. El buen funcionamiento del equipo depende del funcionamiento individual de cada una de sus partes individualmente. En principio dicho funcionamiento puede ser analizado a través del funcionamiento de cada zona y posteriormente de los resultados del acoplamiento.

La velocidad de sólidos transportados no restringida será designada como  $r_1$ , la velocidad de materia fundida no restringida será  $r_2$  y la velocidad de bombeo no restringida será  $r_3$ . Estas son las velocidades a las cuales el proceso ocurrirá si operan de manera independiente las zonas. Bajo las condiciones de

$$r_1 < r_3 \quad \text{ó} \quad r_2 < r_3 \quad \text{---- (1)}$$

se dice que el tornillo está "hambriento". Un tornillo hambriento generalmente nos lleva a una operación errónea y por tanto a una extrusión de baja calidad. Para evitar un tornillo hambriento es necesario diseñarlo de tal forma que:

$$r_1^2 \geq r_2^2 \geq r_3^2$$

---- (2)

Cuando las desigualdades de la ecuación (2) se aplican, se dice que la ZONA 3 "controla" la operación. Cuando esto sucede la operación es más estable y la calidad de extrusión es mejor que cuando cualquiera de las otras zonas controla. De igual modo si las desigualdades son muy grandes el control de la ZONA 3 puede fatigarse y como resultado será una operación errónea también.

El funcionamiento de la ZONA 3 de un extrusor plastificante puede ser analizado utilizando los conceptos desarrollados para un tornillo-bomba. Ha habido avances en el desarrollo de la teoría de transporte de sólidos, sin embargo, hay muy poca evidencia experimental disponible para justificar el uso de los resultados como base de diseño. Con respecto a la ZONA 2 pocas investigaciones tanto teóricas como experimentales han sido reportadas y han habido serios problemas para el desarrollo de una solución general del problema. Por lo que se puede concluir que el extrusor plastificante no se ha sometido al análisis matemático y es por eso que este es mucho menos preciso en la descripción de la operación de extrusores plastificantes que en la de tornillos-bomba.

Cuando la ZONA 3 controla la operación y ninguna de las otras dos zonas presenta tendencias a la fatiga de dicho control, entonces se pueden aplicar las ecuaciones desarrolladas para tornillos-bomba con algún éxito en la operación de extrusores plastificantes.

### 5.8.1. TRANSPORTE DE SÓLIDOS.

El transporte de sólidos ocurre solamente en la ZONA 1 de un extrusor plastificante. La función de esta zona es transportar las partículas sólidas desde el fondo de la tolva de alimentación hasta la ZONA 2 donde ocurre la fusión. Desde un punto de vista práctico el transporte de sólidos no presenta un problema serio en los extrusores

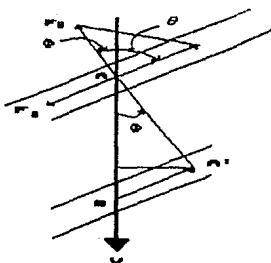


plastificantes cuya alimentación consiste en partículas de flujo libre con un volúmen de densidad relativamente alta.

Una vez conducido hacia el interior del cañón el mecanismo de transporte de sólidos tal vez cambia. Las partículas empiezan a ser compactadas y con tendencia a moverse como una masa única o tapón. El movimiento del tapón resulta de las fuerzas de fricción ejercidas en él desde la superficie metálica del barril o cañón y del tornillo y pueden ser analizadas si se hacen ciertas suposiciones simplificadas.

Desafortunadamente no se han realizado investigaciones experimentales comprensibles acerca del transporte de sólidos en extrusores plastificantes, por lo que no se puede asegurar que las conclusiones estén basadas en una teoría correcta.

La suposición básica hecha en el análisis es que las partículas sólidas están empacadas juntas de tal manera que formen un tapón "elástico" que no experimente un flujo cortante. El tapón actúa sobre fuerzas de fricción existentes entre su superficie y las superficies del cañón y del canal. El análisis se facilita considerando que el cañón es estacionario y que el tornillo es móvil como se muestra en la figura V.10



**FIG. V.10 Movimiento de un tapón elástico en un tornillo acanalado.**

El punto A es un punto de referencia en el tapón. El movimiento del tornillo acanalado es descendente con una velocidad  $V$ . En el tiempo  $t$  se ha movido una distancia  $A-B$  y se localiza en la parte baja del diagrama. El punto de referencia se ha movido ahora a  $A'$ . De aquí entonces que el tapón se ha movido una distancia  $B-A'$  en la dirección del canal.

El movimiento del punto de referencia relativo al cañón está a lo largo de la línea  $A-A'$ . El movimiento del punto de referencia relativo al tornillo está a lo largo de la línea  $B-A'$ . El ángulo  $\phi$  da la inclinación de  $A-A'$  a partir de la vertical. La dirección positiva de  $\phi$  es tomada al ser contrario a las manecillas del reloj.

La velocidad  $v$  a la cual el tapón avanza hacia abajo en el canal, es fácilmente determinada como una función de  $\phi$ :

$$v = \frac{(B-A')}{t} = \frac{V(B-A')}{(A-B)} \quad \text{----- (3)}$$

Notando que B-A' tiene un ángulo  $\theta$  de la vertical, donde  $\theta$  es el ángulo de hélice del tornillo, la ecuación (3) puede ser transformada a:

$$v = V \frac{\text{sen } \phi}{\text{sen}(\phi + \theta)} \quad \text{----- (4)}$$

y utilizando las identidades trigonométricas estándar la ecuación (4) puede ser transformada a:

$$v = \frac{V}{\cos \theta + \text{sen } \theta \cos \phi} \quad \text{----- (5)}$$

Ahora se considerarán las fuerzas de fricción que actúan sobre el tapón. Para un movimiento constante, estas fuerzas deben estar balanceadas y podemos escribir, con referencia a la figura V.10 que:

$$F_i = F_B \cos(\phi + \theta) \quad \text{----- (6)}$$

Como  $\phi$  y  $\theta$  deben ser siempre positivos, las fuerzas de fricción que actúan sobre el tapón desde el cañón deben siempre exceder a las fuerzas de fricción que actúan sobre el tapón desde la superficie del tornillo.

La ecuación (6) puede ser escrita:

$$\cos(\phi + \theta) = R \quad (R \leq 1) \quad \text{----- (7)}$$

donde R es la relación ( $F_i / F_B$ ).

Si el valor de  $R$  es conocido entonces el valor de  $\Phi$  puede ser determinado con la ecuación (7) y la velocidad del transporte de sólidos con la ecuación (5). La única suposición hecha hasta aquí ha sido que la masa de partículas se mueve como tapón.

Es posible deducir el comportamiento del tapón para ciertos casos limitantes.

Cuando  $R = 1$ , el movimiento no es posible. En este caso el ángulo  $\Phi$  es cero. La ecuación (5) demuestra que también  $v$  es cero. Ya que el tapón no realiza ningún avance hacia abajo del canal, simplemente gira alrededor del canal. Bajo estas condiciones la operación de extrusión obviamente se interrumpe. Esto sucederá siempre que el valor de  $R$  sea igual o mayor que la unidad.

El segundo caso limitante sucede cuando el tornillo es excesivamente "resbaladizo" al grado que no ejerza ninguna fuerza de fricción sobre el tapón. Si no hay gradiente de presión en el canal el valor de  $F_s$  se hace cero por lo que  $R = 0$ . Puede verse de la ecuación (7) que  $(\theta + \Phi) = 90^\circ$ . De ahí la ecuación (5) puede ser escrita

$$v = \frac{V}{\cos \theta + \sin \theta \cot(90^\circ - \theta)} = V \cos \theta = V_t \quad \text{----- (8)}$$

$$V_t = 2v$$

Demostrando que la velocidad del tapón es igual a la componente de la velocidad del cañón dirigida hacia abajo del canal del tornillo. Como el promedio de la velocidad para fluidos  $v$  en dirección del canal es  $V_t/2$ , el tornillo es capaz de transportar sólidos a una velocidad volumétrica del doble de la que puede bombear fluidos bajo condiciones de flujo con resistencia.

Un tercer caso especial es considerado si los surcos longitudinales son cortados dentro de la superficie del cañón, para restringir el movimiento del tapón en dirección axial, entonces el ángulo  $\Phi$  sería de  $90^\circ$  y la ecuación (5) se reduciría a:

$$v = \frac{V}{\cos\theta} \quad \text{---- (9)}$$

que puede ser escrita de manera equivalente como:

$$= \frac{2\bar{v}}{\cos^2\theta} \quad \text{---- (10)}$$

donde  $v$  es el promedio de la velocidad para flúidos. Estos resultados son resumidos a continuación:

CONDICIONES LÍMITANTES	VELOCIDAD DEL TAPON
$R = 1$	0
$R = 0$	$2v$
$\Phi = 90$	$2v / \cos^2(\theta)$

Ahora, considerando las condiciones bajo las cuales el movimiento del tapón en el canal del tornillo puede cesar, la ecuación (5) muestra que esta condición se presenta siempre que el ángulo  $\Phi$  sea cero. Se designará la relación de fuerza a la que ésta condición ocurre como  $R^*$ . De la ecuación (7) se puede ver que  $R^*$  es una función del ángulo de hélice. Para ángulos de hélice largos es requerida una mejor relación de fuerza para mantener la operación avanzando, que a pequeños ángulos de hélice. En el límite, cuando el ángulo de hélice disminuye a cero, el valor de  $R^*$  es la unidad.

Suena razonable suponer que durante la operación de un extrusor plastificante la relación de fuerza no es constante. Para condiciones dadas fluctúa entre límites. De hecho, así como la velocidad del tornillo, la temperatura del cañón, la presión del dado y todos los otros factores cambian, es de suponer que afecten la relación de fuerza. Si

se utilizan tornillos con grandes ángulos de hélice, se tiene mayor riesgo de tener una operación intermitente.

Mientras que el análisis indica que con ángulos de hélice pequeños se obtiene una mejor transportación de sólidos, no nos indica qué tan pequeño debe ser el ángulo de hélice o cual será la velocidad de transporte de sólidos.

Como para obtener esta información se requeriría un análisis más detallado de las fuerzas actuando sobre el tapón, se hace una suposición simplificada de que el tapón ejerce presión "hidrostática" igual en todas las superficies con las que está en contacto. Esto quiere decir que no hay gradiente de presión en la dirección del canal. Bajo estas condiciones las fuerzas tangenciales (de fricción) ejercidas en el tapón se obtienen multiplicando el área de la superficie por la "presión" y luego por el coeficiente de fricción. La relación de fuerza R, para este caso especial es:

$$R = \frac{F_a}{F_b} = \frac{A_a \mu_a}{A_b \mu_b} \quad \text{----- ( 11 )}$$

donde  $A_a$  es el área total de la superficie del tornillo que está en contacto con el tapón y  $A_b$  es el área del cañón en contacto con el tapón. Las  $\mu$  son los coeficientes de fricción para la superficie del tornillo y del cañón.

Si el ancho del tramo del tornillo es

$$A_b = \pi DL \quad \text{----- ( 12 )}$$

y el valor de  $A_a$  es dado por la ecuación

$$A_a = \pi (D-2H)L + 2 \int_{R_0}^R Z dr \quad \text{----- ( 13 )}$$

donde  $Z$  es la longitud de la trayectoria de una hélice. La longitud de la trayectoria de una hélice es función de la posición radial coordinada  $r$  y puede ser referida a la longitud axial  $L$  mediante la ecuación:

$$Z = \frac{L}{\text{sen}(\zeta)} \quad \text{----- (14)}$$

Donde el ángulo de hélice  $\zeta$  es función de la posición radial. Combinando las ecuaciones (12), (13) y (14) tenemos,

$$\frac{A_r}{A_b} = 1 - 2 \frac{H}{D} + \frac{2}{\pi D} \int_{r_0}^r \frac{dr}{\text{sen} \theta} \quad \text{----- (15)}$$

El ancho del tramo del tornillo perpendicular al eje  $Z$  del canal está dado por la ecuación

$$W = \pi D \text{sen} \theta \quad \theta = \zeta(R) \quad \text{----- (16)}$$

donde  $D$  y  $\theta$  están medidos en la cresta del tramo. Como  $W$  no varía con  $r$ , las siguientes relaciones son fácilmente establecidas

$$D \text{sen} \theta = D_0 \text{sen} \zeta_0 = 2 r \text{sen} \zeta \quad \text{----- (17)}$$

donde  $\zeta_0$  es el ángulo de hélice en la raíz del tornillo y  $D_0$  es el diámetro de la raíz. De ahí tenemos:

$$\frac{A_0}{A_b} = 1 - 2 \frac{H}{D} + \frac{4}{\pi D^2 \text{sen} \theta} \int_{r_0}^r r dr \quad \text{----- (18)}$$

que al integrarse resulta:

$$\frac{A_s}{A_b} = 1 - 2 \frac{H}{D} + \frac{2(R-R_0)(R+R_0)}{\pi D^2 \sin \theta} \quad \text{---- (19)}$$

esta ecuación puede ser rearrreglada

$$\frac{A_s}{A_b} = 1 - 2 \frac{H}{D} \left[ 1 - \frac{1 - \frac{H}{D}}{\pi \sin \theta} \right] \quad \text{---- (20)}$$

## 5.9. FUSION.

---

Se debe distinguir esencialmente entre dos mecanismos diferentes por los cuales puede llevarse a cabo la fusión en un extrusor plastificante. El primer mecanismo involucra la transferencia de calor del cañón del extrusor hacia las partículas del polímero. La velocidad a la que este proceso puede ocurrir depende del área de la superficie del cañón, de la conductividad térmica del plástico y de los patrones de flujo del canal del tornillo. El segundo mecanismo no involucra transferencia de calor. En el, la energía calorífica requerida para fundir el polímero proviene de la disipación de la energía mecánica a calor durante la deformación del plástico sólido.

Si el primer mecanismo es operativo, la máxima velocidad de fusión (y por consecuencia la máxima velocidad de extrusión) es gobernada por el área de la superficie del cañón, por el factor  $\pi DL$ . Si el segundo mecanismo es operativo, la velocidad de fusión está limitada por la cantidad de fuerza mecánica que pueda ser transmitida a través de la flecha conductora y de la raíz del tornillo. Por lo general esto da un límite mas alto.

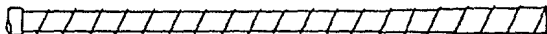
En la mayoría de los extrusores plastificantes, el primer mecanismo de fusión es operativo. De ahí que la velocidad final de extrusión de cualquier extrusor está limitada



o controlada por la transferencia de calor y el extrusor debe ser considerado primeramente como un intercambiador de calor.

Algunas veces es posible operar un extrusor plastificante de tal forma que el segundo mecanismo de fusión sea operativo. Hacer esto ofrece ciertas ventajas sobre el primer método. Velocidades mayores pueden obtenerse con equipos de la misma longitud y diámetro y el plástico es calentado mas uniformemente y con menos peligro de un sobrecalentamiento local. De todas maneras parece ser que esta operación es solamente posible con plásticos que son relativamente "suaves" a temperatura ambiente.

En la extrusión de aquellos plásticos en la cual la fusión sucede a través del primer mecanismo, los tornillos del tipo de dosificación son casi siempre utilizados. La figura V.11 muestra un tornillo de dosificación típico. La relación ( $L/D$ ) está en la escala de entre 16 a 24 y la relación ( $E/D$ ) está cercana siempre a la unidad.



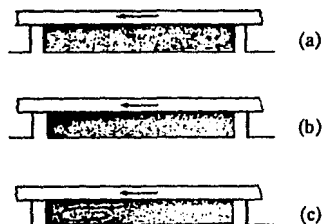
**FIG. V.11 Tornillo de dosificación típico. El paso constante con compresión sucede sobre las 2 ó 3 vueltas de la hélice.**

El transporte de sólidos sucede dentro de las primeras 2 ó 3 vueltas del tramo y el bombeo del fluido en los últimos 3 ó 4 tramos. La zona media (o de fusión) tiene la mayor parte de la longitud del tornillo. La transición de la zona de fusión a la zona de medición puede ocurrir en tan solo media vuelta del tramo o cuando mas en 2 ó 3 vueltas.

La velocidad a la que el polímero puede ser fundido es determinada por la velocidad a la cual el calor es transferido de la superficie del cañón hacia el polímero. Como una primera aproximación se esperaría que la velocidad de transferencia de calor de tornillos de diseño similar y para el mismo material sea proporcional al cuadrado del diámetro. Esta regla exponencial es una base conservativa para la determinación de extrusores plastificantes en los cuales la transferencia de calor es factor controlante.

La investigación de Maddock (17) revela algunos detalles del proceso de fusión. El extruyó polietileno bajo diversas condiciones. Cuando el estado continuo fue alcanzado el tornillo fue detenido y el cañón y el tornillo enfriados. Después de solidificado el plástico en el canal del tornillo, el tornillo fue forzado desde el cañón por un pistón neumático bajo la influencia de un ligero calentamiento del cañón. El plástico fue entonces arrancado del canal y seccionado.

Después de examinar las partes seccionadas, Maddock concluyó que el proceso de fusión empieza cuando las partículas en contacto con la superficie del cañón, están parcialmente fundidas y unta una película de polímero fundido sobre la superficie del cañón. Esta debe ser llamada superficie de fusión y es representada esquemáticamente por la figura V.12(a).



**FIG. V.12 Representación del proceso de fusión en un extrusor de tornillo acanalado.**

Durante este paso del proceso de fusión la transferencia de calor es indudablemente lenta, ya que la masa sólida porosa o tapón bajo la superficie de la película ofrece una pobre trayectoria para el flujo de calor.

Mientras la superficie de fusión continúa, la densidad volumétrica del tapón en el canal aumenta, y las partículas pierden el firme contacto con la superficie del tornillo. Son entonces relativamente libres para moverse en el canal y el movimiento del tornillo relativo al cañón provoca la fusión del material, junto con algunas partículas no fundidas, al recolectarse contra el tramo posterior del tornillo como se muestra en la figura V.12 (b).

Mientras el "fango" en la parte posterior del canal aumenta su volumen, comienza a fluir circularmente, como se muestra en la figura V.12(c). Las partículas no fundidas son acarreadas dentro del "fango" y al ser rodeadas por el fluido caliente son rápidamente fundidas. Una vez alcanzado el estado de "fango" la fusión ocurre rápidamente.

La posibilidad de proveer el calor necesario para fundir el plástico mediante la generación de este a través de la deformación de corte ya ha sido mencionada. El polietileno es uno de los plásticos suaves que pueden ser fundidos así. Bernhardt y McKelvey (18) extruyeron polietileno con 3 tornillos diferentes sobre un amplio rango en las condiciones de operación, bajo condiciones donde la generación de calor a través de trabajo mecánico predominaba. Los resultados de su corrida No. 10, que son típicos, se muestran en la siguiente tabla:

VARIABLES DE OPERACION	
Revoluciones del tornillo	2.5 r.p.s.
Velocidad de administración de calor	0.24 KW
VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO	
Velocidad de extrusión	71.4 lb/hr.
Temperatura de fusión en el dado	311° F
Presión de la masa fundida en el dado	1760 psi
Potencia del motor	5.62 KW

La energía total suministrada es 5.86 KW, de los cuales 0.24 son administrados como energía térmica y 5.62 como energía mecánica.

Esta extrusión es casi completamente independiente de la transmisión de calor externa hacia el plástico.

Los tornillos utilizados por Bernhardt y McKelvey descienden abruptamente en la profundidad del canal después de tan solo 2 ó 3 vueltas del tramo. El objetivo de este diseño es fundir el plástico lo más rápido posible y así proveer una longitud suficiente para que la mezcla fundida alcance la temperatura deseada. Bajo condiciones normales de operación, se encontró que la acción del transporte de sólidos era insuficiente para forzar a las partículas sólidas a penetrar en la zona de fusión, de aquí que la capacidad de fusión del tornillo sea bastante menor que su capacidad de bombeo.

### 5.9.1 CARACTERISTICAS DEL FUNCIONAMIENTO.

Las características del funcionamiento de un extrusor plastificante incluyen la velocidad de extrusión y temperatura, la presión desarrollada por el tornillo y la potencia. Un factor adicional es la uniformidad de presión y temperatura en lo extruído. Esta característica es muy importante ya que determina la calidad de los productos producidos en ciertos procesos de extrusión por ejemplo la fabricación de películas plásticas.

El funcionamiento completo de un extrusor plastificante depende de la capacidad de funcionamiento del tornillo en cada una de sus 3 funciones, transporte de sólidos, fusión y bombeo. Se ha dicho que el funcionamiento de la zona de fusión del tornillo puede ser drásticamente cambiado al alterar la temperatura de la raíz del tornillo en esa sección.

En algunos procesos de extrusión una temperatura de extruido uniforme es esencial. Por ejemplo en la extrusión de película el polímero fundido que entra al dado es dividido en varios flujos. Una masa fundida "fría" y una "caliente" pueden terminar en puntos muy distantes a lo largo del dado. Como la viscosidad es función de la temperatura, la masa fundida "fría" se extruirá a menor velocidad que la "caliente", presentándose así variaciones a través del ancho de la película.

Otro factor importante es el tiempo de residencia, que puede ser definida como el volúmen total del canal del tornillo dividido entre la velocidad de extrusión. Representa la longitud promedio de tiempo requerido por una partícula de polímero para pasar a través del extrusor. Este es un factor particularmente importante cuando se están extruyendo polímeros que son muy sensibles al calor, a temperaturas relativamente altas.

En el diseño de extrusores plastificantes, el objetivo usual es especificar las dimensiones de un extrusor que satisfagan un juego de especificaciones de funcionamiento al mínimo costo. Las especificaciones de funcionamiento incluyen propiedades físicas del material que será extruido, la velocidad de extrusión requerida, la temperatura y presión del polímero fundido en la salida del tornillo y cualquier requerimiento especial con respecto al mezclado, uniformidad o estabilidad. Los resultados exitosos en el diseño se deben al acoplamiento entre la teoría y la experiencia.

Un aspecto dentro del diseño de extrusores es el minimizar la potencia requerida, como un costo directo de la extrusión. La potencia (fuerza) es clasificada tanto térmica

como mecánica. La fuerza térmica se deriva del sistema de calentamiento del extrusor, la mecánica del motor del extrusor. Para especificaciones funcionales dadas (requerimientos de temperatura y presión) el estado termodinámico del polímero ( y de ahí el requerimiento total de fuerza) es fijado.

## **5.10. DISEÑO DE TORNILLOS DE EXTRUSORES PARA LA EXTRUSION DE RECUBRIMIENTOS.**

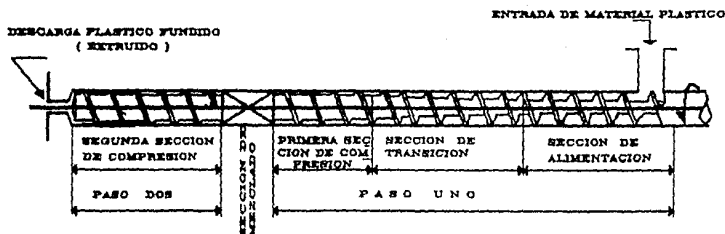
Desde hace pocos años se han presentado avances significativos en el desarrollo de la tecnología del diseño de tornillos, especialmente en lo referente al análisis matemático y a la simulación por computadora del comportamiento del flujo dentro del extrusor.

El procedimiento para diseñar tornillos para extrusores de recubrimiento varía con respecto a aquellos utilizados en película soplada u hoja donde el criterio de diseño es el de obtener una alta velocidad a la temperatura de fusión específica sobre un alto rango de velocidades de salida.

Generalmente este requerimiento se presenta para recubrir ciertas resinas.

La figura V.13 representa un tornillo del tipo considerado. Este tornillo está compuesto por:

1. Sección de alimentación
2. Sección de transición
3. Primera sección de compresión
4. Sección de mezclado con una barrera tipo Egan
5. Segunda sección de compresión



**FIG. V. 13. Perfil de fusión en un tornillo mezclador de dos pasos.**

El polímero alimentado entra a la sección de alimentación a temperatura ambiente y por la combinación del calor del cañón y de la energía de corte transmitida por el tornillo es fundido, mezclado, calentado y bombeado. El polímero fundido sale por el lado izquierdo del tornillo. La sección de mezclado sirve para dos propósitos:

1. Debido a que es una sección de mezclado tipo barrera previene el paso de granalla no fundidas y asegura una completa fusión del polímero.
2. Provee una intensa y alta acción de corte en el mezclado a todo el polímero y esto a su vez hace que se obtenga un producto extruído mucho mejor mezclado que en un tornillo sin este tipo de sección de mezclado.

La temperatura del extrudado depende del diseño del tornillo, de la temperatura del cañón, de la viscosidad del polímero y de la velocidad de extrusión. La profundidad de las secciones de compresión es la variable de diseño de mayor influencia sobre la temperatura de fusión y es por esto que es la variable que debe ser cambiada para optimizar el diseño del tornillo. Como la sección de fusión se hace poco profunda existe mayor energía de corte que se imparte al polímero y por lo tanto la temperatura de fusión aumenta. Inversamente, si la sección de fusión es muy profunda el esfuerzo cortante disminuye y la temperatura de fusión es baja.

En la última década el uso de la computadora para resolver ecuaciones complejas que involucran el diseño del tornillo ha permitido la simulación del diseño de diversos tornillos usando varias resinas bajo diversas condiciones de operación, para así poder seleccionar el diseño óptimo.

### **5.11. CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL TORNILLO.**

En este caso se expondrá el diseño de un tornillo requerido para extruir 545 kg/hr (1200 lb/hr) de PEBD con Índice de fusión de 3, 8 y 12 (MI) con temperatura de fusión sobre el rango de 304.44° C a 326.67° C (580° F a 620° F), con una presión en la cabeza de 102 atm (1500 psi), usando un extrusor de 11.43 cm (4 1/2 pulgadas), 28:1.

Se debe tomar en cuenta el rango de temperaturas permitido por el cañón que permita alcanzar los 580-620° F, ya que si la temperatura del cañón se eleva demasiado se corre el peligro de que ocurra algún tipo de degradación del polímero en el extrusor. A bajas velocidades la temperatura del producto extruído tiende a acercarse a la temperatura del cañón y por lo tanto se calentará más de lo deseado. Cuando el extrusor vuelve a su posición de operación, con una velocidad apropiada, se necesitarán varios minutos para purgar el material sobrecalentado que esté contenido en el extrusor y en el dado o boquilla. El producto así obtenido presenta problemas de olor y termosellabilidad.

Por otro lado, si la temperatura del cañón es muy baja el polímero en el extrusor se enfriará cuando disminuya la velocidad de extrusión y tomará varios minutos alcanzar la temperatura deseada cuando se tenga la velocidad apropiada, durante este tiempo los problemas implican fallas en la adhesión del producto.

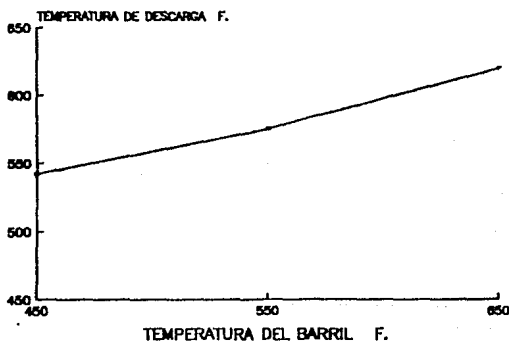
Otra desventaja que presenta el trabajar a baja temperatura en el cañón es que el calor debe ser eliminado para mantener baja la temperatura y esto provocará pérdida



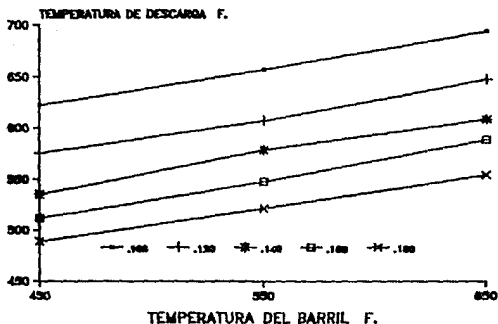
de la energía que el motor aplicará ya que será excesiva en comparación con la requerida.

La figura V.14 representa una curva típica de temperatura de fusión contra temperatura del barril para condiciones dadas tales como tipo de polímero, velocidad y diseño del tornillo. Al aumentar la temperatura en el cañón, la temperatura de fusión también aumenta, pero únicamente en una fracción con respecto al incremento de la temperatura del cañón (barril).

La figura V.15 muestra una curva similar con rangos de profundidad de dosificación. Al disminuir la profundidad de dosificación, la temperatura aumenta. En este caso un cambio en la profundidad de 0.051 cm ( 0.020 plg) provoca un cambio de 1.67° C (35° F) en la temperatura de fusión. Si se mantiene constante la temperatura de fusión, la temperatura del cañón variará 55.56° C (100° F).



**FIG. V.14. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. Tornillo 4 1/2". PEBD MI 8. 1200 lb/hr. Profundidad de dosificación 0.140".**



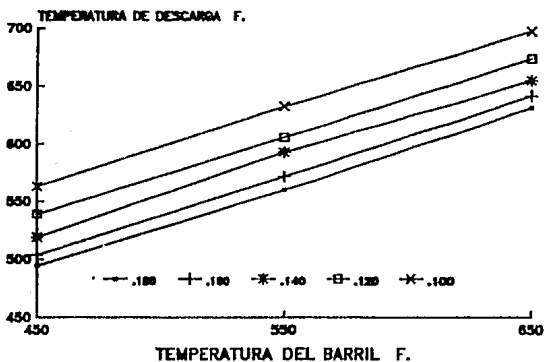
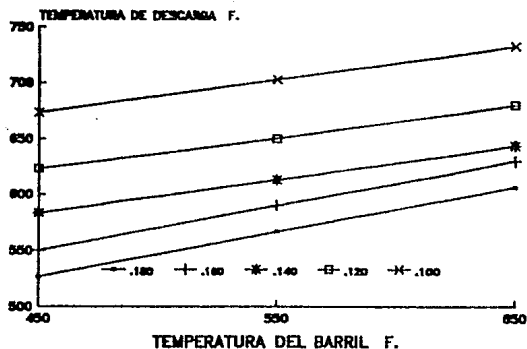
**FIG. V.15 Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. Profundidad de dosificación variable. Tornillo 4 1/2" - 28:1. PEBD MI 8. 1200 lb/hr.**

Por cuestiones de facilidad y debido a que los aparatos de medición proporcionan datos en unidades inglesas, de aquí en adelante se manejarán de esta forma las unidades, por tratarse de un caso particular.

La figura V.16 muestra la comparación trabajando con 1200 lb/hr. y con 400 lb/hr. A la velocidad más baja se presentan 2 cambios importantes:

1. El efecto de la profundidad de dosificación en la temperatura de fusión no es muy grande, con una variación de 0.020 plg. en profundidad cambia únicamente 20° F la temperatura de fusión.
2. La graficación de las líneas es más escalonada, esto indica que la temperatura del cañón tiene una mayor influencia en la temperatura de fusión a 400 lb/hr. que en 1200 lb/hr.. A baja velocidad para obtener la misma temperatura de fusión, cambiando la profundidad de dosificación en 0.020 plg. se requiere solamente un cambio de 30° F en la temperatura del cañón comparado con 100° F para 1200 lb/hr.

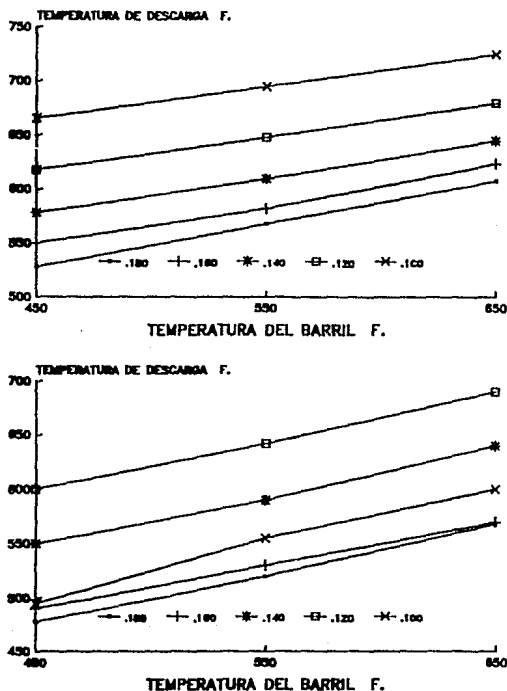
De aquí que el diseño del tornillo es menos crítico para bajas velocidades que para altas.



**FIG. V.16. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. Profundidad de dosificación variable. Tornillo 4 1/2" - 28:1. PEBD MI 3. 1200 lb/hr.**

Otro punto importante es el efecto de la viscosidad del polímero en la temperatura de fusión. La figura V.17 muestra la comparación entre los polímeros de baja densidad con MI 3 vs. MI 12. El polímero más viscoso será el más caliente. En este caso el polímero MI 3 operará aproximadamente a 60° F mas que el MI 12 bajo las

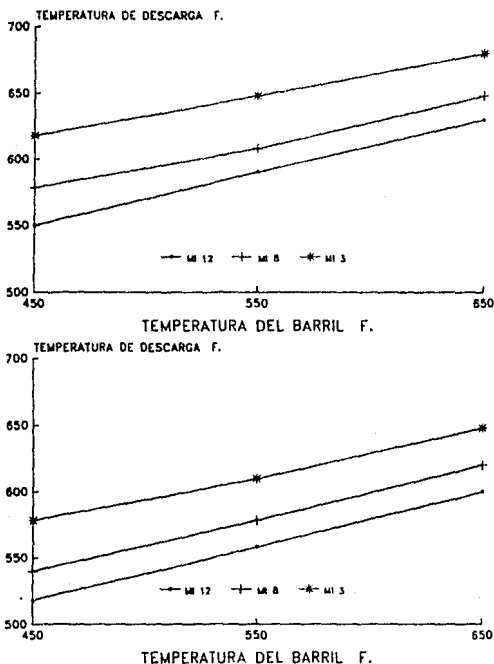
mismas condiciones. Para el mismo diseño y temperatura de fusión, la temperatura será 160° F mayor para el polímero MI 12 que para el MI 3.



**FIG. V.17. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. PEBD MI 3 vs. PEBD MI 12. Tornillo 4 1/2" - 28:1. Profundidad de dosificación variable. 1200 lb/hr.**

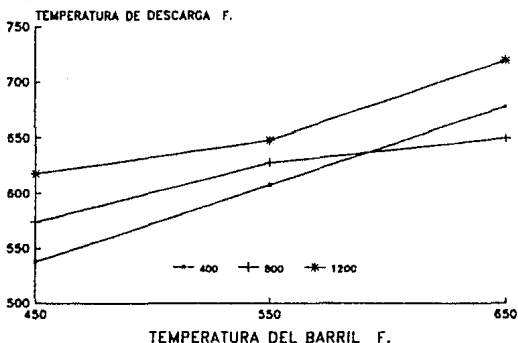
En la figura V.18 se compara el funcionamiento de cada resina para el mismo diseño de tornillo, en este caso un rango de MI 3 a 12 a profundidades de dosificación de 0.12 a 0.14 plg.. En esta gráfica se demuestra que no es posible obtener el rango de

temperatura de fusión deseada de 580 a 620° F para todos los polímeros mientras se tengan los límites de temperatura en el cañón de 450 a 650° F. Con el diseño de 0.12 plg. se puede obtener el rango de temperatura deseado con los polímeros MI 8 y 12 pero no se puede enfriar el MI 3 por debajo de los 620° F. Con el diseño de 0.14 plg. se puede alcanzar el rango de temperatura con los polímeros MI 3 y 8 pero no se puede calentar el MI 12 por encima de los 600° F sin superar los 650° F en el cañón.



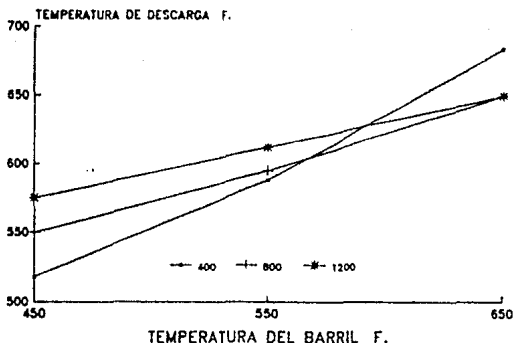
**FIG. V.18. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. PEBD MI 3 vs. MI 8 vs. MI 12. A) Profundidad de dosificación 0.120". B) Profundidad de dosificación 0.140". Tornillo 4 1/2" - 28:1. 1200 lb/hr.**

Después de seleccionar el diseño, es posible visualizar el comportamiento de cada polímero como se muestra en la figura V.19, comparando el funcionamiento del tornillo a diferentes velocidades. Para la resina MI 3, a una velocidad de 1200 lb/hr, como se dijo anteriormente, la temperatura de fusión no puede bajarse a menos de 620° F, sin embargo si se disminuye la velocidad, se puede disminuir la temperatura. En este caso la temperatura baja de 620° F a 540° F cuando la velocidad baja de 1200 a 400 lb/hr.. Nótese que las líneas se intersectan en el punto donde la temperatura del cañón es de 600° F y la temperatura de fusión de 625° F. Este debería ser el punto de operación deseable, sin embargo en este caso este punto se encuentra alejado de la temperatura de operación deseada.



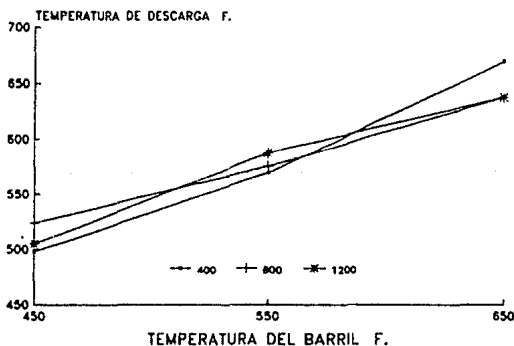
**FIG. V. 19. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. PEBD MI 3. Profundidad de dosificación 0.120". 400 lb/hr vs. 800 lb/hr vs. 1200 lb/hr.**

El comportamiento de la resina MI 8 (fig. V.20) muestra condiciones de operación mucho más deseables. A una temperatura del cañón de 590° F la velocidad puede cambiarse de 400 a 1200 lb/hr. y la temperatura de fusión variará únicamente 10° F. Aquí el punto de intersección cae muy cerca de la temperatura de operación deseada y el extrusor puede ser sacado de línea, operar a baja velocidad y regresar a la velocidad de operación con un cambio mínimo en la temperatura de fusión.



**FIG. V.20. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. PEBD MI 8. Profundidad de dosificación 0.120". 400 lb/hr vs. 800 lb/hr vs. 1200 lb/hr.**

La figura V.21 muestra el comportamiento de este tornillo con resina MI 12. Aquí también el punto de intersección cae muy cerca del punto de operación deseado. Manteniendo la temperatura del cañón a 610° F, la velocidad puede variar de 400 a 1200 lb/hr con un cambio de temperatura de fusión de únicamente 15° F.



**FIG. V.21. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. PEBD MI 12. Profundidad de dosificación 0.120". 400 lb/hr vs. 800 lb/hr vs. 1200 lb/hr.**

Un fenómeno interesante con respecto al punto de intersección o entrecruzamiento es que generalmente se encuentra en el punto donde la temperatura de fusión es de 10 a 20° F mayor que la temperatura del cañón, como se muestra en la siguiente tabla:

	TEMPERATURA °F	
	FUSIÓN	CAÑON
3 MI	670	660
8 MI	630	610
12 MI	610	590

**TABLA V.1**

Una vez que se ha seleccionado el diseño del tornillo, es necesario escoger el mecanismo apropiado en la velocidad y potencia conductora.

Existen otras consideraciones importantes en el diseño: fusión, mezclado, relación de compresión, localización de la sección de mezclado, etc..

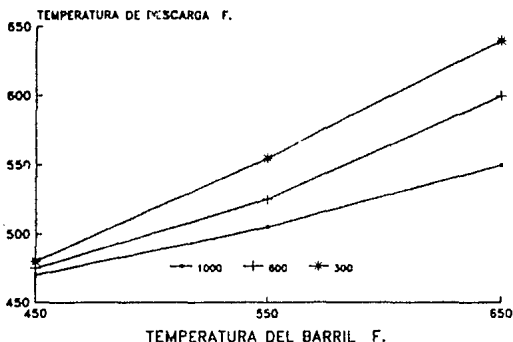
### **5.11.1. HISTORIAL DE CALCULO.**

En un extrusor de 4.5 plg., 24:1, con tornillo de un solo paso (con profundidad de dosificación de 0.125 plg.) se presenta el problema de no poder alcanzar la salida diseñada de 1000 lb/hr en PEBD de MI 12 a 600° F de temperatura de fusión. El problema no era la potencia insuficiente ni la velocidad del tornillo, (había amplia reserva en ambas categorías) sino la incapacidad del extrusor de elevar la temperatura de fusión arriba de 600° F a velocidades superiores de 700 lb/hr.

A 700 lb/hr las zonas del cañón tenían una temperatura de 650° F para alcanzar los 600° F de temperatura de fusión y a 1000 lb/hr no era posible elevar la temperatura a más de 580° F, incluso con una temperatura en el cañón de 700° F. El convertidor no

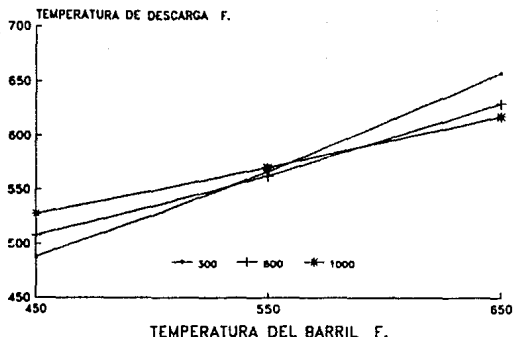


podía operar con temperaturas en el cañón superiores a 650° F debido a los problemas de degradación . Se analizó el tornillo usado por el convertidor y los resultados se muestran en la figura V.22. Estas predicciones están cercanas a lo que se observó. Aquí se ve que a 600 lb/hr se requiere una temperatura en el cañón de 650° F para alcanzar 600° F de temperatura de fusión y a 1000 lb/hr y 650° F de temperatura de cañón, la temperatura de fusión es solamente 550° F.



**FIG. V.22. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. Profundidad de dosificación 0.125". Tornillo convencional 24:1. PEBD MI 12.**

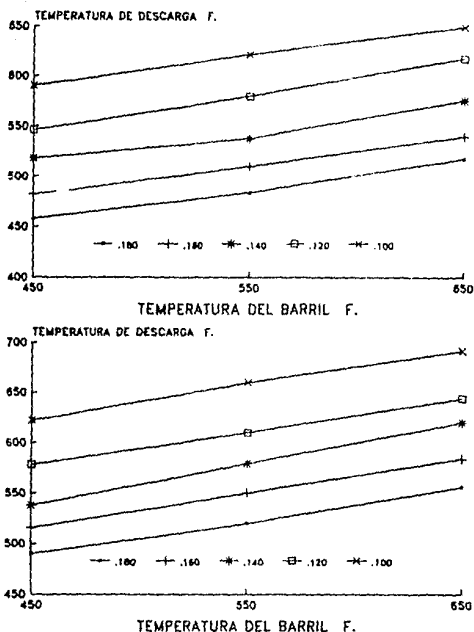
El estudio del diseño se condujo para determinar el diseño apropiado del tornillo para conocer los requerimientos del extrusor. El resultado de este estudio fue un tornillo mezclador con una profundidad de dosificación de 0.115 plg. El comportamiento predicho se muestra en la figura V.23. Sería deseable, incluso, hacer aún menos profundo el tornillo para permitir temperaturas menores a 615° F en el cañón a 1000 lb/hr, pero es necesario arreglar, en este caso, ya que la velocidad máxima del extrusor es fija y la poca profundidad de la dosificación reducirá la salida máxima. En conjunción con el extrusor se decidió que este diseño sería el mejor.



**FIG. V.23. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. Profundidad de dosificación 0.115". Tornillo mezclador 24:1. PEBD MI 12.**

#### 5.11.1.1. ESCALAMIENTO.

Sobre este punto la discusión se confina a extrusores de 4 1/2 plg., 28:1. La figura V.24 muestra la comparación de extrusores de 24:1 y 28:1 a las mismas condiciones de operación. Aquí se muestra que el extrusor 24:1 debe tener una profundidad de 0.020 plg. en la dosificación para alcanzar la misma temperatura de fusión que un extrusor 28:1 a la misma temperatura del cañón. También las curvas para el 28:1 son ligeramente más escalonadas, indicando que es más sensible a la temperatura del cañón. Haciendo la profundidad menor es necesario correr el extrusor 24:1 aproximadamente 15 % más rápido que el extrusor 28:1 para alcanzar la misma velocidad, o para la misma velocidad máxima, el extrusor 24:1 producirá aproximadamente 15 % menos salida que el extrusor 28:1.

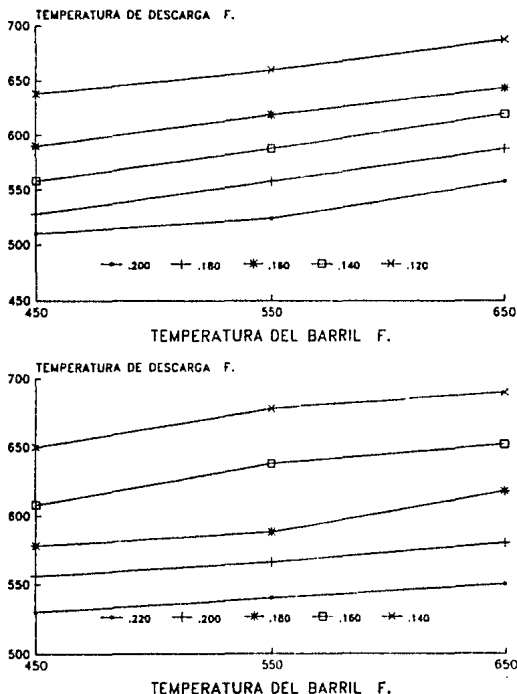


**FIG. V.24. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión. A) Tornillo 4 1/2" - 24:1. PEBD MI 8. 1200 lb/hr. B) Tornillo 4 1/2" - 28:1. PEBD MI 8. 1200 lb/hr.**

Como el extrusor 28:1 es más flexible que el 24:1, se podría pensar en utilizar mejor un extrusor 32:1 o 36:1. La respuesta es que un extrusor mas largo dará una mayor flexibilidad a la misma velocidad, o mayor velocidad a la misma flexibilidad que un de 28:1, pero cuesta más y requiere de mayor espacio.

El 28:1 representa una buena opción, pero en algunos casos se requiere mayor flexibilidad o velocidad, entonces es mejor utilizar extrusores mas largos.

Otro aspecto del escalonamiento es el diámetro del tornillo. La figura V.25 muestra una comparación entre el funcionamiento de extrusores de 3 1/2, 4 1/2, 6 y 8 plg., 28:1 en PEBD de IF 8 a la mayor velocidad de cada extrusor. De la misma forma en que un extrusor mas largo es mas sensible a cambios en el diseño, también es mas sensible a cambios en la viscosidad del polímero. El resultado final es que un extrusor largo no es tan flexible y no tiene la misma capacidad para manejar un amplio rango de polímeros y temperaturas de fusión como un extrusor pequeño.



**FIG. V.25. Temperatura del barril vs. Temperatura de fusión.**  
**A) Tornillo 6" - 28:1. PEBD MI 8. 2100 lb/hr. B) Tornillo 8" - 28:1. PEBD MI 8. 3600 lb/hr.**

## **5.12. CONCLUSIONES.**

---

Usando la nueva tecnología para el análisis y modelamiento del flujo de polímero en un extrusor es posible optimizar el diseño del extrusor para obtener la temperatura de fusión deseada sobre un amplio rango de velocidades y viscosidades.

Se puede observar que cuanto mas grandes son los extrusores, se pierde mas flexibilidad y operatividad sin embargo esto puede neutralizarse haciendo mas largo el extrusor, o usando un extrusor mas grande que el requerido y haciéndolo a bajas velocidades.

## VI. PRUEBAS EN ESCALA INDUSTRIAL.

De la mezcla de polietileno, minerales y titanatos, cuya consistencia es un sólido finamente dividido y totalmente homogéneo, se alimentó una parte a un extrusor tubular Reifenhauer con tornillo de 2 ½" y relación de compresión 4:1 y otra parte a un extrusor-laminador Egan con dado plano para recubrimiento y laminación, con tornillo de dos pasos, relación L/D 28:1 de 4 ½" de diámetro y motor de 250 HP.

El objetivo de la prueba fue apreciar la calidad de la película obtenida en el Reifenhauer, así como el comportamiento del extrusor, principalmente el amperaje en el motor principal.

La segunda porción de la mezcla, que se alimentó al extrusor- laminador Egan tuvo como finalidad hacer las mismas observaciones que en el Reifenhauer y además apreciar la calidad del recubrimiento de polietileno sobre distintos sustratos.

Como se ha mencionado con anterioridad, al incorporar un alto porcentaje de minerales al polietileno que se va a utilizar en la fabricación de película o en el recubrimiento de diferentes sustratos como papeles, celofán o polipropileno, se pretende reducir sustancialmente el costo de materias primas y de ser posible el de fabricación, pero sin menoscabo de la calidad habitual y sin deterioro del equipo.

Quando por los métodos convencionales se adiciona mas del 5 % de carga mineral a una película plástica, de inmediato se observan problemas de calidad en la película, principalmente grumos (defecto crítico cuando la película se usa como envase), desgaste prematuro en el extrusor y aumento en la potencia consumida por el motor del extrusor. De aquí se deduce que al intentar aumentar la proporción de la carga, se aumentarían los costos de operación ya que la energía es uno de los mas importantes renglones en este proceso y por otro lado también aumentarían los costos de mantenimiento.

Por el método que se propone en esta tesis, todos los problemas de calidad de la película y de mantenimiento y conservación del equipo se minimizan, además el aspecto mas ventajoso es la reducción en el consumo de energía.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas. Las principales variables que se regularon durante el proceso fueron:

1. Potencia del motor principal, medida con un amperímetro
2. Revoluciones por minuto, medidas con un tacómetro generador HONEYWELL modelo TP-1
3. Presión en el cañón del extrusor, medida con un transductor P/I DYNISCO.

Las películas que se obtuvieron fueron tratadas electrónicamente, en línea con el proceso de extrusión, con un generador LEPEL electrónico (solid state) con el fin de poderla imprimir.

Se hicieron pruebas de termosellado en las distintas películas obtenidas con una termoselladora SENTINEL de mordazas intercambiables , de tipo lisa y de tipo estriada , con la cual es posible variar el tiempo en que las mordazas se mantienen cerradas, la presión de sellado y la temperatura de sellado.

Por otro lado se hicieron pruebas de resistencia al rasgado, a la elongación y a la explosión de las películas producidas utilizando los siguientes instrumentos de laboratorio:

1. PROBADOR ELMENDORF
2. AMTHOR TESTER
3. MULLEN TESTER

Se realizaron también pruebas en las películas producidas, del coeficiente de deslizamiento en la siguiente forma:

- A) Cara contra cara
- B) Cara contra metal
- C) Cara contra diferentes sustratos

El aparato que se utilizó para hacer estas pruebas es un TMI- SLIP TESTER.

Todos los instrumentos empleados para realizar las pruebas anteriormente mencionadas son aceptados internacionalmente como adecuados para la determinación de especificaciones comerciales , y el método de prueba que se siguió es aceptado internacionalmente por ASTM.



## **6.1 CONCLUSIONES.**

---

Los resultados nos permiten concluir situaciones tan interesantes como las siguientes:

1. La potencia requerida por el motor para extruir una masa de poliolefina con carga mineral hasta del 50%, de los titanatos adecuados, se reduce hasta en un 30% con respecto al valor que tiene al extruir poliolefina pura.
2. La termosellabilidad de las películas cargadas con aditivos inorgánicos, no solamente iguala a las de las poliolefinas puras, sino que incluso, en algunos casos como el del PEAD, las mejora.
3. La resistencia al rasgado se mantiene idéntica en las películas cargadas a la de las poliolefinas puras.
4. La resistencia a la explosión (Mullen) se mantiene igual que la de la película de poliolefina pura.
5. El coeficiente de fricción no sufre cambio al cargar la película hasta con el 50% de agentes minerales.
6. Las propiedades ópticas de la película cargada (opacidad y decoloración por la luz) no sufren menoscabo ante la presencia de carga mineral.

## **6.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.**

---

Con el fin de agilizar el uso de las tablas tenemos la siguiente lista de productos:

- A = Polietileno de baja densidad 20020 X
- B = Polietileno de baja densidad 20020 P
- C = Polietileno de alta densidad 17070 L
- D = Polietileno de alta densidad Gulf 90 D
- E = Polietileno de alta densidad MARLEX HD
- F = Polietileno de alta densidad 409-2 PETROTHENE
- G = "Master batch" 40 % Dióxido de titanio 60 % 20020 X

H = Carbonato de Calcio en talco

I = Sulfato de bario

J = Silicato de aluminio

K = Sílice

L = Meta-silicato de calcio

M = PX Conc. P

N = KR - TTS

O = KR - 38BS

P = KR - 58CS

MISCLA	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	88	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	2	-	-	-
2	70	-	-	-	-	-	-	26	-	-	-	-	-	2	-	-
3	89	-	-	-	-	-	-	39	-	-	-	-	1	1	-	-
4	83	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	1	1	-	-
5	48	-	-	-	-	-	-	60	-	-	-	-	0.5	-	1.5	-
6	57.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	1	-	1.5	-
7	-	54	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	-	1	-	-
8	-	-	-	48	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	2
9	-	-	-	-	48	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	2
10	-	-	-	-	-	48	-	-	50	-	-	-	-	-	-	2
11	-	54	-	-	-	-	-	-	-	44	-	-	-	-	2	-
12	-	-	-	54	-	-	-	-	-	-	-	44	-	-	2	-
13	-	-	-	-	54	-	-	-	-	-	44	-	-	-	-	2
14	70	-	-	-	-	-	-	26	-	-	-	-	-	2	-	-
15	86	-	-	-	-	-	-	33	-	-	-	-	-	2	-	-

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
16	60	-	-	-	-	-	38	-	-	-	-	-	-	2	-	-
17	55	-	-	-	-	-	43	-	-	-	-	-	-	2	-	-
18	-	70	-	-	-	-	28	-	-	-	-	-	-	2	-	-
19	-	65	-	-	-	-	33	-	-	-	-	-	-	2	-	-
20	-	-	70	-	-	-	-	26	-	-	-	-	-	2	-	-
21	-	-	-	-	70	-	-	26	-	-	-	-	-	2	-	-
22	-	-	65	-	-	-	-	33	-	-	-	-	-	2	-	-
23	-	-	-	-	65	-	-	33	-	-	-	-	-	2	-	-
24	-	-	60	-	-	-	-	38	-	-	-	-	-	2	-	-
25	-	-	-	-	60	-	-	38	-	-	-	-	-	2	-	-

NOTA: La corrida # 1 es la mezcla testigo de PEBO con 5% de carga, sin titanato.

MEZCLA	TECNICA DE MEZCLADO	FASE
1	Mezclado en una revolvedora de cemento	Sólida
2	Mezclado en el Banbury y posteriormente en el Cumberland	Sólida
3	Mezclado en el Banbury y posteriormente en el Cumberland	Sólida
4	Mezclado en el Banbury, en el Henschel y por último en el Cumberland	Sólida
5	Mezclado en el Banbury, en el Henschel y por último en el Cumberland	Semilíquida (pastosa)
6	Mezclado en el Banbury, en el Henschel y por último en el Cumberland	Sólida
7	Mezclado en el Banbury, en el Henschel y por último en el Cumberland	Pastosa

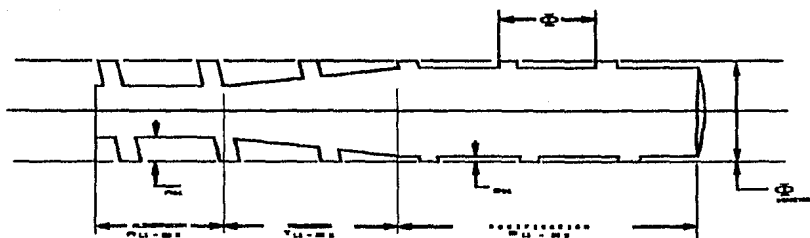
NOTA: A partir de la corrida # 7 y hasta la 25, la técnica de mezclado y la fase en la que se manejó son las mismas.

## 6.2.1 EXPERIMENTO N° 1

EQUIPO: Extrusor tubular de 2 1/2" con tornillo de 1 etapa y con 3 zonas:					
Alimentación		20 %			
Transición		30 %			
Compresión		50 %			
Paso		= 1 diámetro			
Compresión		4:1			
Ad1		= 1.40 cm. (0.552")			
bd1		= 0.35 cm. (0.138")			
Motor de una velocidad 100 HP., 400 V., C.D.					
ORDEN DE LA	ROTORACIÓN DEL TORNILLO (TORQUES)	RPM DEL TORNILLO	CORRIENTE MOTOR TORNILLO (AMP.)	PRESIÓN EN EL EXTRUSOR (ATM)	GASTO DE EXTRUDADO (KG/HR)
1	6500	90	65	136.05	204.3
2	6100	86	59	125.85	209.3
3	6020	86	60	129.25	208.84
4	5900	84	58	122.45	209.75
5	5806	84	57	125.85	208.84
6	5897	85	58	129.25	210.66
7	5890	84	56	125.85	210.2
8	5890	89	65	125.85	204.3
9	5900	90	67	122.45	205.2
10	5806	90	65	129.25	204.3
11	5800	87	51	125.85	217.92
12	5790	79	57	122.45	220.19
13	5796	93	60	122.31	208.84
14	5890	90	50	122.45	211.11
15	5806	86	49	128.57	215.65
16	5900	86	49	127.21	215.65
17	5910	87	48	127.21	217.92
18	5900	89	50	129.25	222.46
19	5906	90	51	127.21	224.73

NOTA: Mezcla # 1 de PEBD con 5 % carga, sin titanato. Mezclas # 8, 9, 10 y 13 de PEAD.

MUESTRA	TEMPERATURAS EN EL BARRIL			TEMPERATURA EN EL DADO
	Z1°C	Z2°C	Z3°C	°C
1	232.22	246.11	248.89	248.89
2	232.22	243.33	246.11	246.11
3	240.56	248.33	248.89	248.89
4	237.78	248.89	248.89	248.89
5	237.78	248.89	248.89	248.89
6	248.89	248.89	248.89	248.89
7	237.78	248.89	248.89	248.89
8	246.11	248.89	248.89	248.89
9	243.33	248.89	248.89	248.89
10	246.11	248.89	248.89	248.89
11	237.78	248.89	248.89	248.89
12	243.33	248.89	248.89	248.89
13	246.11	248.89	248.89	248.89
14	237.78	248.89	248.89	248.89
15	237.78	248.89	248.89	248.89
16	232.22	248.89	248.89	248.89
17	232.22	248.89	248.89	248.89
18	232.22	248.89	248.89	248.89
19	243.33	248.89	248.89	248.89



-Diámetro 4 1/2 " = 11.43 cm. -Longitud 24 diámetro = 2.74 m. -Relación de compresión 4:1 -Paso 1 diámetro = 11.43 cm.				
Adl				
0.552"	5Φ	7Φ	12Φ	0.138"
1.4 cm	57.15 cm	80.01 cm	137.16 cm	0.35 cm

FIG.VI.1. TORNILO DE UN SOLO PASO.

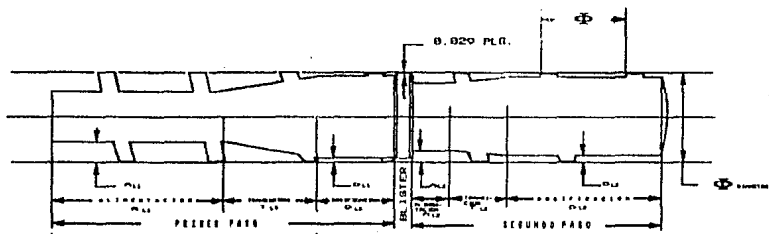
## 6.2.2 EXPERIMENTO Nº 2

EQUIPO: Extrusor tubular de 2 1/2" con tornillo de 2 pasos con "Blister".					
- Primer paso:					
Alimentación 50 %					
Transición 25 %					
Dosificación 25 %					
- Segundo paso :					
Alimentación 16 % después del "Blister"					
Transición 25 %					
Dosificación 59 %					
MEZCLA	PAR DE TOR- SIÓN DEL TORNILLO (IN-6)	R.P.M. DEL TORNILLO	CORRIENTE DEL MO- TOR(AMP)	PRESION (ATM)	GASTO DE EXTRUDADO (KG/HR)
1	6410	87	60	142.85	219.282
2	6405	86	59	138.05	220.19
3	6398	88	57	129.25	222.46
4	6380	88	57	122.45	222.46
5	6379	89	54	125.85	222.46
6	6379	87	48	125.85	224.73
7	6290	87	43	129.25	227.00
8	6265	87	42	129.25	227.00
9	6264	86	42	129.25	227.00
10	6265	84	40	127.55	222.46
11	6090	86	41	122.45	222.46
12	5800	83	45	129.25	224.73
13	5850	83	48	129.25	224.73
14	5800	84	48	115.65	224.73
15	5905	86	40	119.05	224.73
16	5700	88	40	115.65	224.73
17	5600	86	40	125.85	224.73
18	5550	86	41	122.45	224.73
19	5560	85	42	122.45	224.73

MEZCLA	TEMPERATURAS EN EL BARRIL				TEMPERATURA EN EL DADO
	Z1°C	Z2°C	Z3°C	Z4°C	
1	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
2	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
3	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
4	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
5	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
6	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
7	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
8	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
9	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
10	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
11	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
12	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
13	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
14	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
15	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
16	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
17	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
18	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89
19	226.67	237.78	237.78	237.78	248.89

NOTA: La mezcla # 1, testigo, es de PEBD con 5 % carga sin titanato.





- Diámetro = 4 1/2" = 11.43 cm  
 - Longitud = 28 diámetros = 3.2 m  
 - Relación de compresión =  
   1er. paso = 3.5:1  
   2do. paso = 2.0:1  
 - Paso = 1 diámetro

Ad1	Ad2	T1	Df1	Df2	Ad1	Ad2	T2	Df2	Dd2
0.8"	8Φ	4Φ	4Φ	0.17"	0.38"	2Φ	3Φ	7Φ	0.19"
1.52 cm	91.44 cm	45.72 cm	45.72 cm	0.43 cm	0.96 cm	22.86 cm	34.29 cm	80.01 cm	0.48 cm

FIG.VI.2. TORNILLO DE DOBLE PASO.

### 6.2.3 EXPERIMENTO N° 3

EQUIPO: Extrusor tubular de 2 1/2" con tornillo de múltiples pasos					
MEZCLA	PAR TOR- NÓN DEL TORNILLO PASOS	R.P.M. TOR- NILLO	CORRIENTE MOTOR DEL TORNILLO (AMP.)	PRESION EN EL EXTRU- SOR (ATM.)	GASTO DE EXTRUJADO (KG/HR)
1	5100	60	60	142.85	222.46
2	5000	60	45	136.05	227.00
3	5000	79	48	134.70	229.27
4	4980	75	47	135.37	227.45
5	4985	75	45	135.37	231.54
6	4960	75	45	134.70	231.54
7	4980	75	48	125.85	232.45
8	4985	79	48	135.37	229.27
9	4890	79	43	134.01	227.00
10	4890	75	42	133.87	229.27
11	4870	75	41	134.15	235.63
12	4870	75	41	134.01	231.54
13	4850	75	41	133.95	231.54
14	4870	75	40	135.37	231.54
15	4890	75	40	135.37	233.81
16	4500	79	40	122.45	235.63
17	4100	78	42	123.13	236.08
18	4050	75	40	122.32	227.00
19	4050	75	40	122.45	227.00

NOTA: La mezcla # 1, testigo, es de PEBD con 5 % de carga mineral, sin titanato.

NÚMERO	TEMPERATURA EN EL BARRIL				TEMPERATURA EN EL DADO		
	Z1°C	Z2°C	Z3°C	Z4°C	Z1°C	Z2°C	Z3°C
1	248.89	248.89	254.44	254.44	244.54	254.44	254.44
2	250.00	250.00	254.44	254.44	257.22	257.22	257.22
3	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
4	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
5	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
6	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
7	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
8	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
9	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
10	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
11	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
12	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
13	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
14	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
15	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
16	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
17	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
18	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44
19	248.89	250.00	250.00	254.44	244.54	254.44	254.44

## 6.2.4 EXPERIMENTO N° 4

EQUIPO: Línea EGAN de recubrimiento por extrusión con tornillo de 4 1/2", relación L/D 24:1, relación de compresión 4:1, con tornillo múltiple, con una sección intermedia de mezclador.

Motor de C.D. de dos velocidades de 250 HP con reductor de engranes Philadelphia.

Recubrimiento de papel GLASSIVE de 50 g/m con 24 gramos de polietileno cargado.

MEZCLA	PAR TOR- SION TORNI- LLO (TORQUE)	R.P.M. TORNI- LLO	CORRIEN- TE MO- TOR TOR- NILO (AMP.)	PRESION DEL EXTRUSOR (ATM.)	VELOCI- DAD DE LA LINEA DE EX- TRUSION (M.P.M.)	GASTO (KG/HR)
1	5500	150	200	122.45	30.480	408.60
20	5500	160	140	115.65	33.530	445.00
22	5500	155	138	119.05	32.005	442.65
24	5500	155	141	119.05	33.530	445.00
21	5500	155	140	121.77	30.480	400.00
23	5500	155	146	121.77	30.480	400.00
25	5500	155	148	121.09	30.480	400.00

NOTA: Mezcla #1, testigo, Polietileno 17070 L con 5 % carga mineral sin titanato. Las mezclas # 20, 22, 24, se hicieron con polietileno de baja densidad. Las mezclas # 21, 23, 25, se hicieron con polietileno de alta densidad.

MEZCLA	TEMPERATURAS DEL BARRIL				
	21°C	22°C	23°C	24°C	25°C
1	287.78	293.33	304.44	315.56	326.67
20	288.33	296.11	307.22	321.11	329.44
22	288.33	296.11	307.22	321.11	329.44
24	288.33	296.11	296.11	321.11	329.44
21	293.83	298.89	298.89	321.11	427.15
23	293.83	298.89	298.89	321.11	427.15
25	293.83	298.89	298.89	321.11	427.15

	TEMPERATURAS DEL DADO				
	Z1°C	Z2°C	Z3°C	Z4°C	Z5°C
1	321.11	326.67	326.67	326.67	321.11
20	323.89	329.44	329.44	329.44	329.44
22	323.89	329.44	329.44	329.44	329.44
24	323.89	323.89	323.89	329.44	329.44
21	326.67	332.22	332.22	332.22	332.22
23	326.67	332.22	332.22	332.22	332.22
25	326.67	332.22	332.22	332.22	332.22

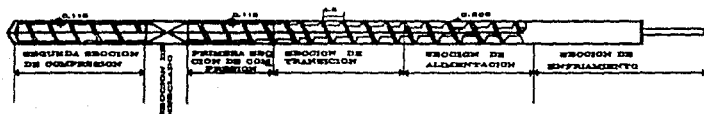


FIG.VI.6 EXTRUSOR EGAN

## VII. RESULTADOS.

Como se puede observar en las tablas que se presentan en el capítulo anterior<sup>1</sup>, los resultados que se obtuvieron durante las diversas pruebas realizadas son altamente satisfactorios. A continuación haremos un breve resumen de los resultados mas importantes.

En cuanto al tipo de película que se obtuvo en cada corrida, podemos decir que todas cumplen con los requerimientos comerciales y con las especificaciones de ASTM.

Se utilizaron 6 tipos distintos de polietileno, dos de ellos de baja densidad y cuatro de alta densidad. Todos ellos de procedencia nacional, se utilizaron como cargas minerales un "master batch" con 40 % de dióxido de titanio y 60 % PEBD 20020 X, carbonato de calcio, sulfato de bario, silicato de aluminio, sílice y metasilicato de calcio. Los agentes de unión utilizados que mejores resultados proporcionaron fueron los titanatos KR- TTS, KR-38BS y KR-58CS.

Se llevaron a cabo 25 mezclas con diferentes composiciones dejando siempre una mezcla testigo de PEBD con 5 % de carga mineral y sin titanato.

La técnica de mezclado para la obtención de una homogeneización óptima fue básicamente la misma en todos los casos a excepción de la mezcla testigo, la cual fue mezclada en una revolvedora de cemento, y las mezclas número 2 y 3 las cuales no

1 CAP.VI. Pruebas en escala industrial

fueron mezcladas en el Henschel. La mayor parte de las mezclas se manejaron en fase semilíquida ( pastosa ), y el resto se manejo en fase sólida.

Para el experimento número 1 se utilizó un extrusor tubular de 2 ½ " con tornillo de una etapa y con 3 zonas las cuales son divididas de la siguiente manera:

Zona de alimentación	20 %
Zona de transición	30 %
Zona de compresión	50 %

El paso del tornillo es de un diámetro, la compresión 4:1 con un área en la zona de alimentación de 1.4 cm. ( 0.552 ") y de 0.35 cm. ( 0.138" ) en la zona de compresión.

El diámetro del tornillo es de 4 ½ " ( 11.43 cm. ). La longitud es 24 veces el diámetro es decir, 2.74 m. La longitud en la zona de alimentación es de 57.15 cm., en la zona de transición es de 80.01 cm. y en la de compresión es de 137.16 cm..

El motor es de una velocidad, de 100 HP, 400 V, de corriente directa.

Las variables que se midieron durante esta prueba fueron el torque del tornillo ( pie-libra ), las revoluciones por minuto del tornillo, la corriente del motor que mueve al tornillo ( amp. ), la presión en el extrusor ( atm. ) y el gasto de extrudado ( kg/hr. ). Por otro lado también se midieron las temperaturas en el barril y en el dado ( °C ).

En cuanto al torque los valores obtenidos fluctuaron entre 6500 y 5790, siendo que la mezcla que dio el mayor valor fue la mezcla testigo y la que dio el menor valor fue la mezcla número 12. En revoluciones por minuto del tornillo el valor máximo presentado fue de 93 en el caso de la mezcla numero 13, sin embargo el segundo valor mas alto fue de 90 el cual se presentó en la mezcla testigo, el valor mínimo que se obtuvo fue de 79 el cual se presentó en la mezcla número 12 nuevamente.

El amperaje que se leyó en el motor tuvo un valor máximo de 67 en el caso de la mezcla número 9 pero el valor inmediato inferior que se registró asciende a 65 el cual se presentó en la mezcla testigo, la lectura mínima tuvo un valor de 48 y se obtuvo en la mezcla número 18. En la mezcla número 12 se obtuvo una lectura de 57.

En cuanto a la presión en el extrusor las lecturas variaron entre 136.05 como máxima presentándose en el caso de la mezcla testigo, y de 122.31 como mínimo en el caso de la mezcla número 13. La mezcla número 12 obtuvo una lectura de 122.45.

La cantidad de extrudado que se obtuvo fue como máximo 224.73 en el caso de la mezcla número 19 y como mínimo 204.3 en el caso de la mezcla testigo. El gasto obtenido para la mezcla número 12 fue de 220.19.

Analizando estos datos se puede inferir que en el caso de la mezcla testigo, la cual no tiene titanato, las lecturas que se hicieron nos demuestran que de todas las mezclas es la que peores resultados da. Es decir, tiene el mayor torque, el mayor valor para r.p.m. del tornillo, el mayor amperaje en el motor, la mayor presión en el extrusor y el menor gasto.

En cuanto a las otras mezclas se puede observar que las variaciones obtenidas fluctúan en un rango relativamente pequeño, sin embargo se puede hablar por ejemplo de la mezcla número 12 la cual se encuentra entre los mejores valores generales.

En cuanto a las temperaturas que se registraron en el barril, se hizo el registro por zonas. En la zona 1 o de alimentación se registró una temperatura máxima de 248.9 en el caso de la mezcla número 6 y un valor mínimo de 232.2 en el caso de la mezcla testigo. La mezcla número 12 obtuvo un valor de 243.3. En la zona 2 o de transición la temperatura máxima fue de 248.9 siendo que esta temperatura prevaleció a partir de la mezcla número 4 y se mantuvo hasta la mezcla número 19. La temperatura mínima que se registró fue de 243.3 en la mezcla número 2 y en la mezcla testigo se



obtuvo una temperatura de 246.1. En la zona 3 o de compresión la temperatura se mantuvo constante en todas las mezclas y fue de 289,9 a excepción de la mezcla número 2 que registró una temperatura de 246.1. Todas las temperaturas se registraron en grados Celsius.

La temperatura que se registró en el dado dio el mismo valor en todas las mezclas a excepción de la mezcla número 2 que registró una temperatura de 246.1.

Para el experimento número 2 se utilizó un extrusor tubular de 2 ½ " con tornillo de 2 pasos con "Blister".

El primer paso se divide de la siguiente manera:

Alimentación	50 %
Transición	25 %
Compresión	25 %

El segundo paso se divide de la siguiente manera:

Alimentación	16 % ( Después del " Blister " )
Transición	25 %
Compresión	59 %

El diámetro del tornillo es de 4 ½ " ( 11.43 cm. ), la longitud es de 3.20 m. repartida de la siguiente manera:

La primer zona de alimentación con una longitud de 91.44 cm., la primer zona de transición con una longitud de 45.72 cm. y la primer zona de compresión con una longitud de 45.72 cm.. La segunda zona de alimentación con una longitud de 22.86 cm., la segunda zona de transición con una longitud de 34.29 cm. y finalmente la segunda zona de compresión con una longitud de 80.01 cm..

La relación de compresión del primer paso es de 3.5:1 y la del segundo paso de 2:1.

El área de paso en el " Blister " es de 0.074 cm. ( 0.029 " ).

El área de paso en la primer zona de alimentación es de 1.52 cm. ( 0.60 " ), en la primer zona de compresión es de 0.43 cm. ( 0.17 " ), en la segunda zona de alimentación es de 0.96 cm ( 0.38 " ) y en la segunda zona de compresión es de 0.48 cm. ( 0.19 " ).

Las variables que fueron medidas en este experimento corresponden a las mismas que fueron medidas en el experimento anterior.

En cuanto al torque del tornillo la lectura máxima fue de 6410 correspondiente a la mezcla testigo y la mínima fue de 5550 correspondiente a la mezcla número 18. En este caso la mezcla número 12 obtuvo una lectura de 5800.

En relación a las r.p.m. del tornillo la lectura máxima fue de 89 registrada en la mezcla número 5. La mezcla testigo registró un valor de 87. La lectura mínima fue de 83 registrada entre otras en la mezcla número 12.

La corriente en el motor tuvo una lectura máxima de 60 correspondiente a la mezcla testigo y una mínima de 40 registrada en las mezclas número 10, 15, 16 y 17. La mezcla 12 en este caso registró una lectura de 45.

En cuanto a la presión en el extrusor la lectura máxima fue de 142.85 correspondiendo a la mezcla testigo y la mínima fue de 115.65 correspondiendo a las mezclas 14 y 16. La mezcla 12 registró una lectura de 129.25.

El gasto que se obtuvo fue, el máximo de 227 correspondiente a las mezclas 7, 8 y 9. El mínimo fue de 219.3 correspondiente a la mezcla testigo. La mezcla 12 en este caso obtuvo 224.73.

Al igual que en el experimento anterior observamos que los resultados menos convenientes son los obtenidos con la mezcla testigo que no contiene titanatos.

Las temperaturas registradas en el barril fueron constantes para todas las mezclas, siendo que en la zona 1 se tuvo una lectura de 226.7, en la zona 2 de 237.8 y en la zona 3 de 237.8. En el dado ocurrió lo mismo, las temperaturas se mantuvieron constantes para todas las mezclas, siendo la temperatura para la zona 1 de 237.8 y para la zona 2 de 248.9.

En el experimento número 3 se utilizó un extrusor tubular de 2 ½" con tornillo de múltiples pasos.

Prácticamente se puede decir que el comportamiento seguido por las mezclas durante este experimento fue el mismo que en los dos anteriores, como puede observarse en las tablas de resultados que se encuentran en el capítulo anterior, por lo que el análisis en este caso no se hará.

En cuanto al experimento número 4 se realizó recubrimiento de papel GLASSI-VE de 50 g/m con 24 g. de polietileno cargado.

Se realizó en una línea EGAN de recubrimiento por extrusión con tornillo de 4 ½", relación L/D 24:1, relación de compresión 4:1, con tornillo múltiple, con una sección intermedia de mezclado.

En este caso la mezcla testigo fue hecha con PEAD 17070 L con 5 % de carga mineral, sin titanato. Las mezclas que se manejaron fueron la 20, 21, 22, 23, 24 y 25. Estas mezclas se distribuyeron de la siguiente manera:

Las mezclas 20, 22 y 24 se hicieron con PEBD, las mezclas 21, 23 y 25 se hicieron con PEAD.

Las variables que se midieron fueron las mismas que en los experimentos anteriores, el torque ( pie-libra ), las revoluciones por minuto en el tornillo , la corriente en el motor del tornillo ( amp. ), la presión en el extrusor ( atm. ) y el gasto de extrudado ( kg/hr ), sin embargo en este caso también se midió la velocidad en la línea de extrusión ( m.p.m. ).

En el caso del torque el valor que se obtuvo se mantuvo constante para todas las mezclas, este fue de 5500.

El valor máximo obtenido en las r.p.m. del tornillo fue de 160 en el caso de la mezcla número 20, el valor mínimo fue de 150 en el caso de la mezcla testigo y las demás mezclas mantuvieron un valor constante de 155.

La corriente del motor tuvo un valor máximo de 200 correspondiente a la mezcla testigo, mientras que el valor mínimo registrado fue de 138 para la mezcla 22. En el caso de las mezclas de PEAD el valor mínimo fue de 140 para la mezcla 21 y el máximo fue de 148 para la mezcla 25.

En cuanto a la presión en el extrusor la lectura máxima fue de 122.45 correspondiente a la mezcla testigo. La mínima fue de 115.65 correspondiente a la mezcla 20. Para las mezclas de PEAD la lectura mínima fue de 121.09 para la mezcla 25 y las otras dos mezclas obtuvieron una lectura de 121.77.

La velocidad en la línea de extrusión máxima fue de 33.53 correspondiente a las mezclas 20 y 24. La mínima fue de 30.48 y corresponde a la mezcla testigo y a las mezclas 21, 23 y 25.

El gasto máximo que se obtuvo fue de 445 correspondiendo a la mezcla 20. El gasto mínimo fue en el caso de las mezclas 21, 23 y 25 con un valor de 400. La mezcla testigo tuvo un gasto de 408.60.

Observando los datos anteriores podemos decir que las mezclas que mejor comportamiento tuvieron fueron aquellas hechas con PEBD y titanatos, cargadas con minerales. Podemos decir que la mezcla testigo en general obtuvo los peores resultados y fue seguida por las mezclas de PEAD.

También se midieron las temperaturas ( °C ) en el barril y en el dado. Los resultados obtenidos son los siguientes:

En el barril se tomaron lecturas de 5 zonas. En la zona 1 la mezcla testigo registró la temperatura mínima, siendo de 287.8, las mezclas de PEBD registraron todas la misma temperatura de 288.3 y las mezclas de PEAD con temperatura de 293.8.

En la zona 2 sucedió lo mismo, la mezcla testigo registró una temperatura de 293.3 mientras que las mezclas de PEBD registraron temperatura de 296.1 y las mezclas de PEAD registraron temperatura de 298.9.

En la zona 3 se registraron ligeras variaciones, la mínima temperatura correspondió a la mezcla de PEBD número 24 siendo de 296.1, las mezclas de PEAD tuvieron una temperatura constante de 298.9, mientras que la máxima la obtuvieron las mezclas 20 y 22 de PEBD con 307.2. La mezcla testigo registró una temperatura de 304.4.

En la zona 4 la temperatura mínima fue de la mezcla testigo con 315.5 y las demás mezclas mantuvieron una temperatura de 321.1.

En la zona 5 la temperatura mínima correspondió a la mezcla testigo con 326.7. Las mezclas de PEBD conservaron una temperatura de 329.4 y las mezclas de PEAD tuvieron una temperatura de 427.1.

En el dado las variaciones de temperatura fueron menores. En la zona 1 la temperatura mínima fue de 321.1 registrada por la mezcla testigo mientras que las mezclas de PEBD mantuvieron una temperatura de 323.9 y las mezclas de PEAD mantuvieron una temperatura de 326.7.

En la zona 2 la temperatura mínima correspondió a la mezcla 24 siendo de 323.9. La mezcla testigo tuvo una temperatura de 326.7, las mezclas 20 y 22 con temperatura de 329.4 y las mezclas 21,23 y 25 con 332.2.

En la zona 3 se repitieron los valores de la zona 2.

En la zona 4 se repitieron los valores de la zona 2 a excepción de la mezcla 24 la cual varió a 329.4 consiguiendo la misma temperatura de las mezclas 20 y 22.

En la zona 5 la única variación que se registró fue en el caso de la mezcla testigo la cual disminuyó su temperatura a 321.1 misma que tenía en la zona 1.

En el caso de la temperatura, tanto en el barril como en el dado observamos que la mezcla testigo alcanzará, prácticamente en todos los casos la temperatura mínima. Las mezclas de PEBD mantendrán casi en todos los casos una temperatura intermedia y la temperatura máxima de operación la mantendrán generalmente las mezclas de PEAD.

Como ya se ha comentado anteriormente los mejores resultados generales se obtuvieron en todos los casos en mezclas con titanatos, mientras que la mezcla testigo, que no tenía titanato, nos reportó en su mayor parte los peores resultados.

## VIII. CONCLUSIONES.

Como se puede apreciar al observar los datos de los experimentos realizados, se lograron los objetivos planteados inicialmente, con excelentes resultados.

Primeramente obtuvimos película pigmentada de excelente calidad, mediante el método propuesto, logrando así obtener productos aptos para la comercialización, utilizando un método novedoso, además como se había mencionado anteriormente y como renglón de primera importancia, abaratando, de manera sustancial, algunos costos de fabricación.

Entre los componentes que se utilizaron y que hicieron posible la disminución de los costos están el meta-silicato de calcio y el carbonato de calcio, los cuales, al igual que el dióxido de titanio, tienen como función dar al polietileno una pigmentación blanca, y la sílice para películas transparentes, sin embargo resultan mucho más económicos que el dióxido de titanio, el cual es utilizado hoy en día para este efecto.

Por otro lado también se logró incrementar el porcentaje de carga mineral al polietileno del que actualmente puede adicionarse por los métodos en uso, sin afectar ninguna de las propiedades reológicas de la película y sin disminuir su calidad.

Al adicionar mayor carga mineral lógicamente la cantidad de resina virgen necesaria disminuye, lo que a su vez hace disminuir los costos ya que el precio de cualquiera de los productos utilizados como carga mineral en comparación con el precio de la resina de polietileno es mucho menor, así, al requerirse menor cantidad de resina virgen para obtener un producto similar, y en ocasiones mejor al comercial, hace que este proceso sea atractivo para realizarse a nivel industrial, ya que representa un gran ahorro en materia prima.



Hablando de otros aspectos por los cuales consideramos que este proceso es realmente eficaz, nos referiremos al ahorro en el consumo de energía eléctrica que se logra al tener, en lugar de una mezcla de un compuesto orgánico ( polietileno ) y uno inorgánico ( dióxido de titanio ), un complejo formado por el polietileno, el titanato ( como agente de unión ) y la carga mineral.

Sobre este punto podemos decir que al adicionar mayor cantidad de carga mineral, al contrario de lo que puede esperarse, el requerimiento de potencia en el motor del extrusor en lugar de aumentar, disminuye. De hecho, resulta ser aún menor la potencia requerida para extruñr el complejo formado, que para extruñr película de polietileno virgen.

Esta disminución en el consumo de energía eléctrica llega a ser hasta de una tercera parte del requerido para la producción de película de polietileno virgen.

Considerando que el costo del KWH industrial es de \$ 145.33<sup>1</sup> y el consumo promedio normal, en un proceso de producción de película pigmentada con dióxido de titanio es de 45 KWH aproximadamente, el costo por hora que esto representa es de \$ 6,539.85 ; con el método propuesto se logra una disminución de \$ 2,179.95 por hora, lo que representa un gran ahorro en los costos de insumos en la producción mensual, pasando de \$4'708,692.00 a \$3'139,128.00.

Otro punto importante que debe ser mencionado es que, al no seguir manteniéndose a la carga mineral como tal dentro del extrusor, el desgaste que usualmente sufre el equipo, especialmente el cañón del extrusor, se ve disminuido sustancialmente pues ya no se produce el roce continuo de las partículas minerales contra la pared del equipo. Por lo que al no sufrir tal desgaste, aumenta la vida útil y no es necesario

1 Precio medio de la Tarifa 8, al 28 de mayo de 1990.

reemplazarlo continuamente lo que también va a repercutir en la disminución de los costos de producción y mantenimiento puesto que este equipo es sumamente costoso.

Sin embargo, a pesar de todas las ventajas que presenta este método, surge un problema, en la actualidad la producción de los titanatos utilizados como agentes de unión en nuestro caso, solamente se realiza en dos países, E.U.A. y Japón.

Por esta razón, se debe agregar que sería muy importante realizar investigaciones dirigidas hacia la obtención de los titanatos en nuestro país y así poder producirlos en escala industrial. Resultaría una industria muy promisoría ya que con todo lo anteriormente expuesto y considerando el volumen de envases plásticos pigmentados que se consumen en el país, no cabe la menor duda de que dicha producción sería económicamente factible y además, como también se ha dicho el consumo de materias primas, tales como el polietileno y el dióxido de titanio se vería reducido hasta en un 50 %, siendo que representan una parte muy importante al considerar los costos de producción.

También debe tenerse presente al hablar de las ventajas que presentaría producir los titanatos en el país, que este proceso que planteamos conlleva una disminución considerable en el consumo de energía eléctrica, insumo básico en la vida diaria, y por lo tanto podría hablarse de cooperación por parte de la ciencia y la tecnología en el ahorro de esta importante fuente energética.

Podemos decir que con esta tesis se abren las puertas a trabajos de investigación posteriores, con un amplio rango de aplicación y sumamente importantes en el campo de los envases flexibles y en general en las ramas que incluyan producción y procesamiento de diversos polímeros cuya aplicación en la actualidad es tan amplia como la imaginación del ser humano.

## IX. BIBLIOGRAFIA

---

---

(1)

**McMillan, F**

- **Polyolefins**  
1985

---

---

(2)

**von Pechmann, H**

- **Chem Ber**  
1898  
Vol. 31  
p. 2643

---

---

(3)

**Fawcett, EW; Gibson, RO**

- **J Amer Chem Soc**  
1934  
p. 386

---

---

(4)

**Ziegler, K**

- **Petr Refiner**  
1955  
Vol. 34  
p. 111

---

---

( 5 )

**McMillan, F**

- **The Chain Straighteners**
- **McMillan**  
*London*  
*1979*  
*pp 56-58*

---

---

( 6 )

**Peters, E I, Ziets, A Evering, B L**

- **Ind Eng Chem**  
*1957*  
*Vol. 49*  
*p. 1879*

---

---

( 7 )

**Sallors, H R; Hogan, J P**

- **Macromolecular SciChem**  
*1981*  
*Vol. A 15 (7)*  
*p. 1377*

---

---

( 8 )

**Chem Age**

- **Octubre 1980**  
*Chem Systems*

---

---

( 9 )

**SRI International**

- **World Photochemicals Program**  
*Enero 1984*

---

---

(10)

**Modern Plastics**

*October 1980*

---

---

(11)

**Danckwerts, P V**

■ **Appl Sci Res**

1952  
Vol. 3  
p. 279

---

---

(12)

**Weidenbaum, S S**

■ **Mixing of Solids**

*Advances in Chemical Eng, Vol II*  
*Academic Press*  
1958

---

---

(13)

**Mohr, W D**

■ **Mixing and Dispersing**

*ch 3 of Processing of Thermoplastic*  
*Materials*  
*Ed E C Bernhardt*  
*Reinhold Publishing Co*  
1959

---

---

(14)

**Maddock, BH**

■ **SPE Journal**

Vol. 15  
p. 383  
1959

---

---

( 15 )

**Bolen, W R, Colwell**

■ **S P E Tech Papers**

1958  
Vol. IV  
p. 1004

---

---

( 16 )

**Goldbond**

■ **Polymeric Materials**

*McGraw Hill*

---

---

( 17 )

**Sweeting**

■ **The Science and Technology of  
Polymer Films, Vol I y II**

*Wiley Inters*  
1971

---

---

( 18 )

**Organic Coating Technology, Vol I y II**

■ **Payne Wiley**

1965  
4 ed

---

---

( 19 )

**Winding C, Hiatt G**

■ **Polymeric Material**

*McGraw Hill*  
1961

---

---

( 20 )

Ives, Mead and Riley

- Handbook of Plastics Test Methods  
*The Plastics Institute*  
1971

---

---

( 21 )

Brown, G

- Unit Operations  
*J Willey*  
1956

---

---

( 22 )

Du Pont

- Surlyn A