

Paty S

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**“PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PELÍCULA SOPLADA A
BASE DE POLIETILENOS (MEZCLAS)”**

CASO DE ESTUDIO

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE:**

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

NAYELI CHAVERO JUÁREZ

SALTILLO, COAH.



AGOSTO 2007

26 OCT 2007

RECIBIDO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**“PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PELÍCULA SOPLADA A
BASE DE POLIETILENOS (MEZCLAS)”**

CASO DE ESTUDIO

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE:**

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

NAYELI CHAVERO JUÁREZ

ASESOR:

M.C. SANTIAGO SÁNCHEZ LÓPEZ

SALTILLO, COAH.

AGOSTO 2007

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**“PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PELÍCULA SOPLADA A
BASE DE POLIETILENOS (MEZCLAS)”**

CASO DE ESTUDIO

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE:**

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

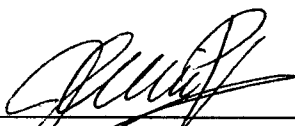
PRESENTA:

NAYELI CHAVERO JUÁREZ

EVALUADORES:



DR. MARIO GUTIÉRREZ VILLAREAL



M.C. JESÚS OLIVO PADILLA

SALTILLO, COAH.

AGOSTO 2007

ÍNDICE

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

CAPITULO I. EXTRUSIÓN	1
1.1 Elementos de un Extrusor	1
1.2 Husillo	3
Factores que afectan el transporte del plástico	4
Proceso de fusión del plástico	5
Efecto del Índice de la Ley de la Potencia	9
Tipos de fluido	10
1.2.1 Tipos de Husillo	10
1.2.2 Relación de Compresión	11
1.3 Cabeza del Extrusor y Dado	11
1.3.1 Plato rompedor	12
1.3.2 Mallas o filtros	12
1.3.3 Adaptador	13
1.3.4 Dado	13
Orientación y Cristalización	14
1.4 Comportamiento del plástico durante la extrusión	15
1.4.1 Flujo a través de un canal simple y canal rectangular	15
1.4.2 Índice de Fluidéz	16
Normas y Métodos	19
1.4.3 Reometría y reología	20
Normas y Métodos	23
1.4.4 OFusión del polímero	24

1.5	Técnicas de Extrusión	25
1.5.1	Extrusores Mono-husillo	26
1.5.2	Extrusores de Doble Husillo	26
1.5.3	Co-extrusión de láminas y películas	27
1.6	Zonas de Mezclado	28
1.6.1	Husillos Especiales	31
1.7	Extrusión Soplo	31
1.7.1	Maquina Extrusora	32
1.7.2	Dado o Cabezal	33
	Cabezal de Alimentación Central	34
	Cabezal de Alimentación Lateral	35
	Cabezal para Extruir a Dos colores	35
	Cabezal para Co-extrusión	36
1.7.3	Anillo de Enfriamiento	36
	Factores que Influyen en la Eficiencia del Anillo	41
	Anillos Rotatorios	42
1.7.4	Torre Estructural	42
1.7.5	Altura del Tiro	43
1.7.6	Planos Guías	44
1.7.7	Calandria de Tiraje	45
1.7.8	Embobinadores	45
1.8	Parámetros de Operación	46
1.8.1	Materia Prima	46
1.8.2	Aditivos Utilizados	47
	Aditivos Disponibles	48

1.8.3	Enfriamiento en el Interior de la Burbuja	49
1.8.4	Velocidad de Extrusión	50
1.8.5	Velocidad de Tiro	50
	Relación de Soplado	50
	Relación de Tiraje	51
	Regularidad Dimensional	53
1.8.6	Temperatura de Enfriamiento	53
1.8.7	Aplicaciones	54
1.9	Extrusión de Películas y Láminas	55
1.10	Defectos relativos al aspecto de la Película	56
1.11	Defectos debido a las Variaciones Dimensionales	60
1.12	Influencia de las Condiciones de Extrusión en las Propiedades de la Película Tubular	62

CAPITULO II. POLIETILENO **63**

	Películas de polietileno de baja densidad	64
	Películas de polietileno de alta densidad	65
	Películas de polietileno lineal de baja densidad	67
	LDPE vs. HDPE	69
2.1	Película de LDPE	69
	Propiedades comparativas entre los diferentes grados de PE	71

CAPITULO III. MEZCLAS	72
3.1 Mezclas Miscibles	72
3.1.1 Realización de las Mezclas	73
3.2 Mezclas Inmiscibles	75
3.3 Mezclas de Polietilenos	76
Mezclas de LLDPE/LDPE	76
3.3.1 Propiedades Mecánicas	78
Procesabilidad	81
3.3.2 Otras mezclas de PE	82
3.4 Polietileno en Película Soplada	84
ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	86
ÁREAS DE OPORTUNIDAD	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS	91

INTRODUCCIÓN.

El proceso de extrusión es uno de los procesos de transformación más importantes dentro de la industria del plástico. Esto debido a la amplia variedad de componentes que se le pueden adicionar a las maquinas extrusoras para obtener diferentes productos, como lo son: tuberías, concentrados, perfiles, mezclas, películas entre otros.

Por lo que para efectos del presente trabajo nos es de gran interés el proceso de extrusión soplada para películas, Esto es debido a que es uno de los métodos más comunes en la manufactura de película (también conocida como Película Tubular). El proceso involucra la extrusión de plásticos a través de un dado, seguida por una expansión tipo burbuja.

Siendo que este proceso es usado debido a las ventajas de manufacturar dentro de este proceso:

- Producción del tubo en una sola operación.
- Mejoras de control de ancho y el espesor de la película mas homogéneo controlado con aire dentro de la burbuja, la salida del extrusor y la velocidad del husillo.
- Elimina efectos finales tales como corte de orilla y temperatura no uniforme que puede resultar de la extrusión de película en dado plano

Por otra parte se tiene una capacidad de orientación biaxial (permitiendo uniformidad de las propiedades mecánicas), obteniendo espesores menores de 0.254mm que en ocasiones puede llegar hasta 0.5mm de espesor.

Obteniendo con este proceso películas mono-capa simples para bolsas, hasta estructuras multicapa muy complejas utilizadas para empaquetado de alimentos. Por lo que en los

últimos años se ha estudiado los avances en resinas termoplásticas de alto consumo, como lo son los polietilenos, polipropilenos, poliestirenos y PET.

Por lo que se han evidenciado ofertas de nuevos polietilenos de mediana densidad y de alto peso molecular, HMW-MDPE, y de alta densidad con alto peso molecular, HMW-HDPE, para la fabricación de películas de alto desempeño. También son de destacar las nuevas resinas de polietileno de muy baja densidad, VLDPE, para moldeados con propiedades mecánicas superiores. Las nuevas resinas de polietilenos lineales de baja densidad con base en hexeno o buteno, LLDPE, que nos proporcionan la posibilidad de hacer películas con mayor rigidez y balance de propiedades de resistencia; y las nuevas resinas de baja densidad, LDPE, que permiten realizar laminaciones por extrusión a mayores velocidades de operación.^[1]

Debido a esto una gran parte de la industria del plástico está trabajando con una amplia gama de grados en resinas de polietileno, debido a sus propiedades, manejo y costo.

Con el crecimiento de la competencia industrial y el incremento en los requerimientos de desempeño en muchos productos, se ha creado una tendencia a buscar nuevos materiales de bajos costo y con nuevas propiedades, encontrando materiales compuestos a partir de mezclas de los ya conocidos para el proceso de extrusión sople, aportando novedosas propiedades a bajos costos.

Por lo que la búsqueda de nuevos materiales plásticos dentro del proceso de extrusión sople para películas tubulares en años recientes, se han reportado mezclas de polietilenos de alta, con polietilenos de baja para lograr hacer materiales mas resistentes al impacto, a la tensión dependiendo del porcentaje de cada uno de los componentes dentro de la mezcla, así como de polietilenos lineales de baja densidad con polietilenos de baja densidad, mencionados anteriormente.

CAPITULO I. EXTRUSIÓN

El proceso de extrusión es uno de los más importantes en la industria de la transformación de plásticos. Ya que es muy amplia la variedad de productos que se pueden obtener mediante este proceso de transformación, como son: tuberías, flejes, perfiles, botellas, películas, etc. Así como también dicho proceso se utiliza en la preparación de mezclas, concentrados y formulaciones, que posteriormente son utilizados en otros procesos de transformación.

Básicamente este proceso consiste en transportar, fundir, homogenizar y bombear a un material plástico a través de un dado donde adquiere su forma final.

Este proceso alimenta continuamente material termoplástico ya sea en polvo o en grano, esto es mediante un tornillo sin fin o husillo, fluyendo el material dentro del barril que se encuentra bajo un perfil de calentamiento, donde el material que es transportado por el husillo se funde o reblandece dependiendo de la naturaleza del material, saliendo posteriormente a través de un dado, cuyo forma de este dará la forma final al producto extruido.

Para este fin se necesita un extrusor que consta de un elemento básico como lo es el husillo, ya que este mediante su giro dentro del barril, es capaz de fundir y bombear material a una velocidad específica bajo ciertas condiciones de operación.

1.1 ELEMENTOS DE UN EXTRUSOR

La Figura (1) muestra las principales partes que componen a un extrusor:

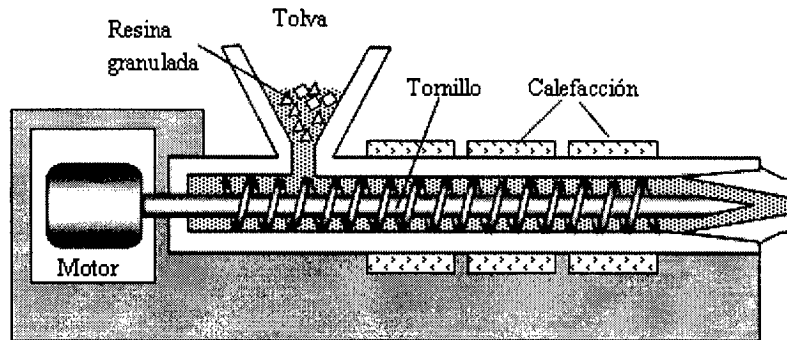


Figura 1. Componentes de una Máquina de Extrusión.

Se puede observar que el extrusor se compone de una serie de elementos importantes para el control y operación del proceso como son:

- Sistema Motriz
- Sistema de dosificación del material plástico
- Husillo, barril y sistema de calentamiento
- Cabezal del extrusor y dado
- Sistema de Control

Estos elementos se encargan del funcionamiento y control del extrusor, teniendo en cuenta que trabajan coordinadamente uno con otro. Iniciando con el control de la velocidad de rotación del husillo (Sistema Motriz), que tienen que cumplir con los requerimientos necesarios como son: el costo y su potencia. Tomando en cuenta la regularidad o cantidad de material que se dosifica, las condiciones en las que se realiza, tipo de material y sus propiedades que determinarán el tipo de husillo a utilizar y el perfil de temperaturas que se maneja en cada una de las zonas.

Posteriormente una vez que el material se encuentra en las condiciones adecuadas, se hace fluir hacia el dado, para que este obtenga la forma final, esto se logra cuando el material pasa a través de un cabezal y de un dado, donde el fluido previamente pasó por un plato rompedor de flujo para lograr mejor homogenización.

1.2 HUSILLO

Un husillo es un cilindro compuesto de una serie de hélices diseñados para transportar, fundir y mezclar el plástico, que gira libremente dentro del barril. Este tiene una relación de distancia de su diámetro exterior con respecto al diámetro interno del barril, denominando claro y que fluctúa en una milésima de pulgada por cada pulgada de diámetro del husillo.

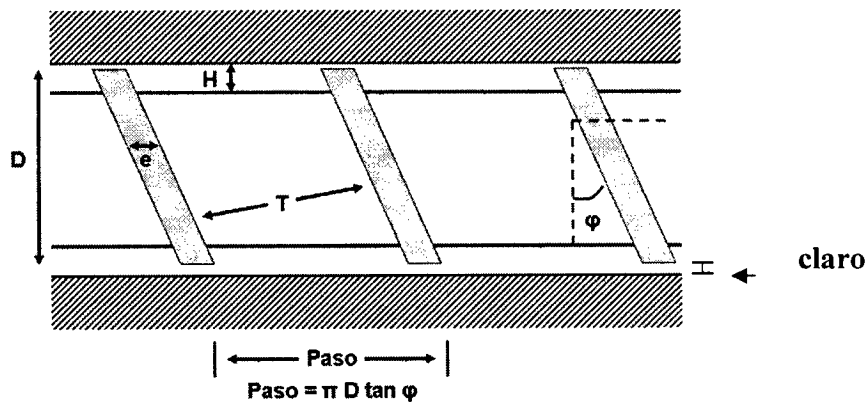
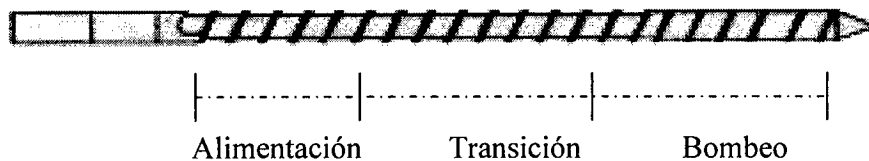


Figura 2. Esquema del interior del cilindro de un extrusor, que muestra las variables de un husillo.

En la Figura (2), se muestra el diseño donde se consideran diferentes variables que intervienen durante el proceso de extrusión y que se ven reflejadas en la eficiencia del proceso de diferentes materiales, siendo estas: La profundidad del Canal (H), Ancho de Canal (T), Longitud del Paso (E), Angulo de la Hélice (α), Diámetro (D), Longitud (L). Dos aspectos importantes son: la relación de L/D y la relación de compresión H_2/H_1 , esta última es la relación que existe entre el volumen del canal próximo de la tolva, con respecto al del extremo cercano al dado.

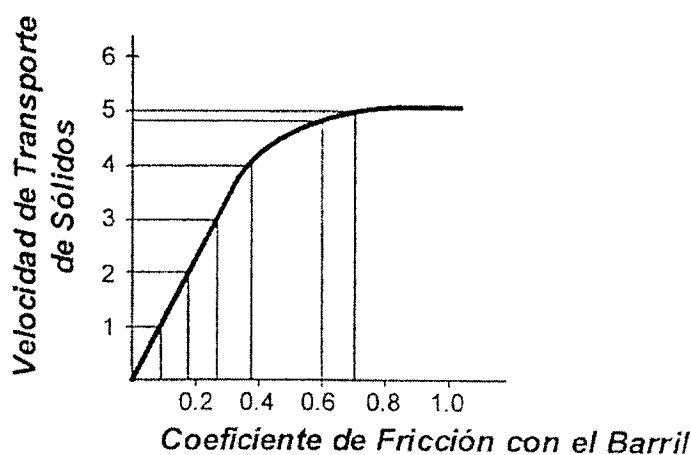


La sección de alimentación es la que presenta mayor profundidad de canal, diseñado así para el transporte del plástico sin fundir.

La sección de transición, compresión, plastificación o fusión, manifiestan un cambio gradual de profundidad de canal, de una mayor profundidad en la zona de alimentación hasta la menor profundidad en la zona de dosificación. En esta sección se realiza la fusión o plastificación del material plástico y contiene siempre una mezcla de plástico sin fundir y plástico fundido. La sección de dosificación es la que tiene la menor profundidad de canal. En esta zona se transporta el plástico fundido y se mezclan los componentes de una manera homogénea.

Factores que afectan el Transporte del Plástico:

Fricción. Puede existir fricción interna o externa, esto dependiendo de las interacciones que se involucran ya sea entre el mismo material o con el equipo. En la tolva se requieren que ambas fricciones sean bajas, para que el material pueda fluir hacia la zona de alimentación, en el husillo se requiere una fricción interna alta para que pueda ser transportado fácilmente, además de tener una fricción externa alta entre el plástico y el barril y una fricción baja entre el plástico y el husillo, para obtener un mejor transporte hacia el dado.



Densidad.

Densidad del Plástico: es el peso de una unidad de volumen del plástico, expresada en g/cm^3 , o en Kg/Lt , siendo esta alrededor de 1g/cm^3 o 1Kg/Lt .

Densidad Aparente del Plástico: es la densidad del plástico, incluyendo el aire que se encuentra entre los gránulos o partículas de plástico.

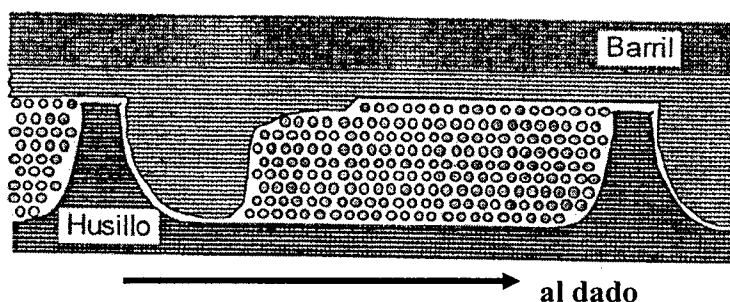


Figura 3. Esquema del comportamiento del material plástico en el husillo.

La densidad que se utiliza generalmente para este proceso en los materiales plásticos se encuentra alrededor de 0.3 a 0.7g/cm^3 o 0.3 a 0.7Kg/Lt , cuando la densidad aparente es menor a 0.3g/cm^3 , el proceso de extrusión en un extrusor convencional ya no es posible, esto es debido a el comportamiento reológico del material, por lo cual se evalúa el tipo de husillo que tendrá que ser utilizado en dichas condiciones. Siendo esta densidad aparente la que hace que el gránulo sea empujado por el plástico fundido.

Compresibilidad del Plástico. Se define esta como la diferencia en porcentaje entre la densidad aparente y la densidad aparente compactada. Por lo que a un alto valor de compresibilidad indica una alta tendencia de los gránulos del plástico a compactarse durante el almacenamiento.

Proceso de Fusión del Plástico:

Velocidad de Fusión. Esta se ve afectada por el ancho de la cama sólida, es decir, el ancho de la masa sin fundir dentro del canal del husillo, y por el espesor de la película de

plástico fundido que se forma entre la cama sólida y la pared del barril por la fusión del plástico.

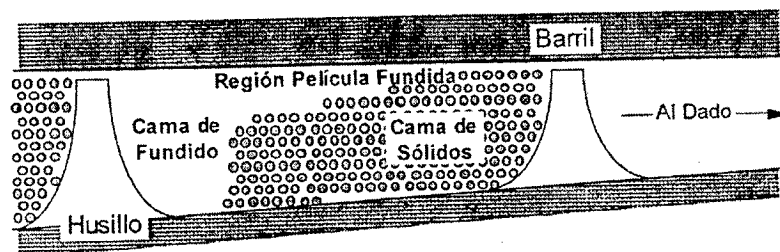
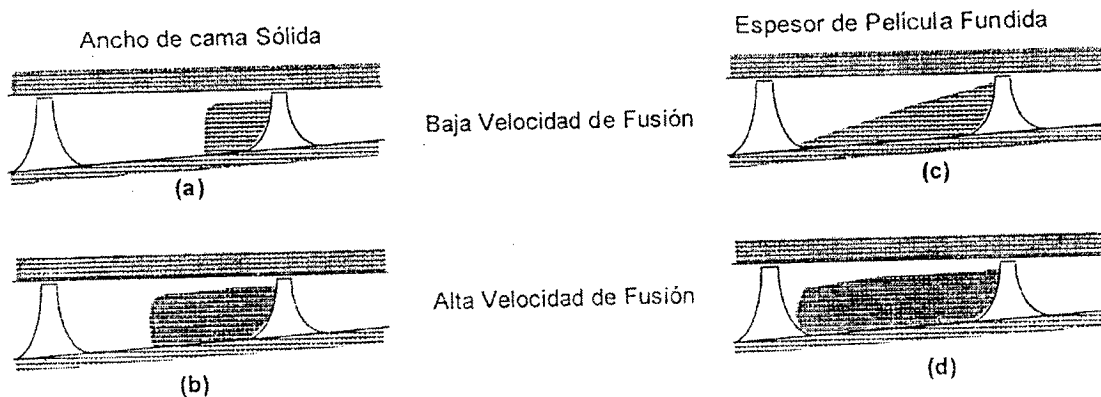


Figura 4. Esquema de la cama sólida con respecto al barril y a la cama del fundido.

Variables que afectan la velocidad de fusión:

- a) *Ancho de la cama sólida*: entre más ancha sea, mayor será la velocidad de fusión.
- b) *Espesor de la película de plástico fundido*: entre menor sea el espesor de esta película de plástico sin fundir; mayor será la generación de calor por fricción. Teniendo en cuenta que entre mayor sea el desgaste del borde de la hélice del husillo, menor será la generación de calor, y por lo tanto menor la velocidad de fusión.



Zona de Transporte del Fundido. En esta zona el plástico es transportado por arrastre debido al giro del husillo.

Gasto o Producción del Extrusor. Esta es el que nos dará el gasto o producción del extrusor, este será igual al flujo de arrastre menos el flujo de presión.

- a) *Flujo de Arrastre*. es la cantidad de material que se transporta hacia delante, debido a la rotación del husillo.

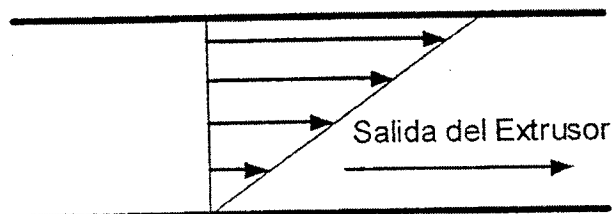


Figura 5. Comportamiento del fundido en el interior de un extrusor, barril-husillo (Flujo de Arrastre).

La velocidad de flujo del plástico fundido cerca de la pared del barril, es mayor, y esta velocidad disminuye a medida que se va moviendo hacia la pared del husillo, hasta que finalmente esta es cero en la superficie del husillo.

Para calcular el flujo de arrastre, se tiene:

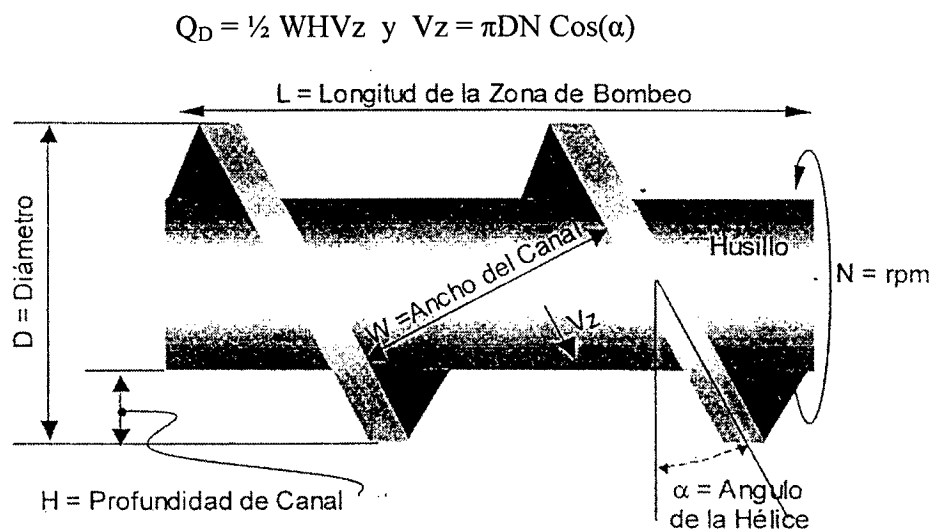


Figura 6. Comportamiento del fundido en el interior de un extrusor, barril-husillo (Flujo de Arrastre).

- Donde:
- W. ancho del canal del husillo, cm.
 - H. profundidad del canal del husillo, cm.
 - Vz. Velocidad del flujo por el canal del husillo, cm/seg.

D. diámetro del husillo, cm.

N. velocidad de rotación del husillo, rev./min.

α . Ángulo de la hélice del husillo, grados.

- b) *Flujo de Presión*. es la cantidad de material que se transportará hacia atrás, debido a la diferencia de presiones entre los dos extremos del husillo.

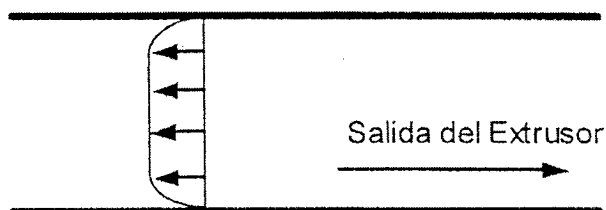


Figura 7. Comportamiento del fundido en el interior de un extrusor, barril-husillo (Flujo de Presión).

Donde se tiene una mayor velocidad en el centro del canal del husillo y decrece a medida que nos vamos alejando de este y nos acercamos a las paredes laterales del canal del husillo, tomando en cuenta que este flujo es hacia atrás, desde un extremo de alta presión (donde se encuentra el dado) hasta otro extremo de baja presión (donde está la tolva).

Para calcular este flujo de presión Q_p , se tiene:

$$Q_p = (1/12) (WH^3 \text{ Sen}\alpha/\eta) (\Delta P/L)$$

Donde:

η . viscosidad del flujo, dinas seg/cm² = poises.

$\Delta P/L$. cambio de la presión “ ΔP ” (dinas/cm²), a lo largo de la sección de dosificación del husillo “L”, cm.

Por lo tanto el proceso solo podemos modificar la temperatura y la velocidad de giro para reducir el flujo de presión como función de la viscosidad del fundido y su presión.

- c) Combinación de los Flujos de Arrastre y de Presión, la combinación de estos flujos resulta en un perfil de velocidades como se muestra en la siguiente figura.

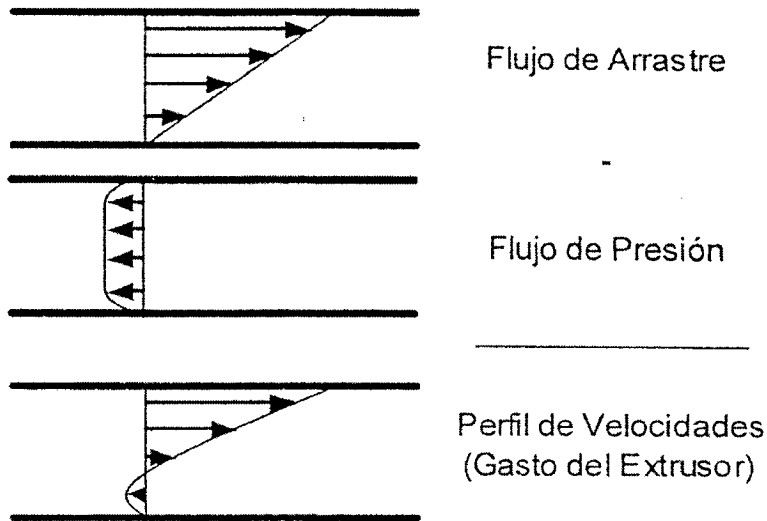


Figura 8. Comportamientos del fundido en el interior de un extrusor, barril-husillo.

Un aumento en el flujo de presión reducirá el gasto o producción total del extrusor, pero aumentará la circulación del plástico dentro del canal del husillo. Esta mayor circulación del plástico producirá mayor mezclado, mayor generación de calor por fricción, y menor gasto o producción del extrusor.

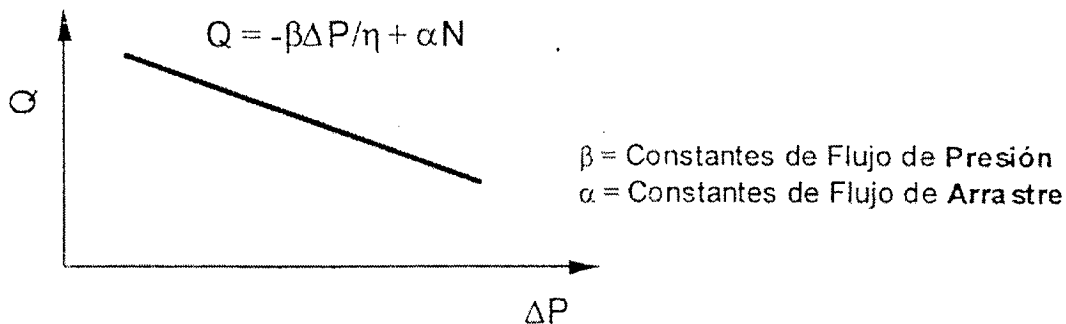


Figura 9. Grafica de gasto del extrusor con respecto a la diferencia de presión.

Efecto del Índice de la Ley de la Potencia:

Teniendo en cuenta que estas ecuaciones solo aplican para fluidos Newtonianos. Para fluidos No-Newtonianos, como en el caso de los plásticos, será necesario realizar algunas modificaciones: el valor para el flujo de arrastre se tiene que multiplicar por el

factor: $(4+n)/5$, es decir, que el flujo que realmente avanza por arrastre varia de 80 a 100% del flujo calculado.

Para el caso del flujo de presión se tiene que multiplicar por el factor: $3/(1+2n)$, es decir, que el flujo que realmente retrocede por presión varia de 1 a 3 veces el flujo calculado. En ambos casos, n representa el índice de la ley de la potencia.

Tipos de Fluidos:

Fluidos No-Newtonianos. Los materiales plásticos no exhiben el comportamiento simple de un fluido newtoniano, teniendo estos fluidos un comportamiento diferente que se clasifican en tres tipos:

- a) fluidos independientes del tiempo, estos son fluidos cuya viscosidad es independiente del tiempo, pero dependen de la velocidad de corte y de la temperatura.
- b) fluidos dependientes del tiempo, son fluidos cuya viscosidad depende del tiempo y, además, de la velocidad de corte y de la temperatura.
- c) materiales viscoelásticos, son fluidos no-newtonianos que muestran un comportamiento predominantemente viscoso, pero que exhiben un comportamiento elástico de manera parcial.^[2]

1.2.1 TIPOS DE HUSILLOS

Estos husillos se utilizan para la extrusión de plástico de gran volumen (PE, PP, PVC, PS), que presentan un gran intervalo en su fusión. Presentando una zona de compresión prolongada, mientras que para plásticos de ingeniería (Nylon, PC, PET), estos husillos presentan una zona de compresión corta ya que exhiben un intervalo corto de fusión. (Figura 10)

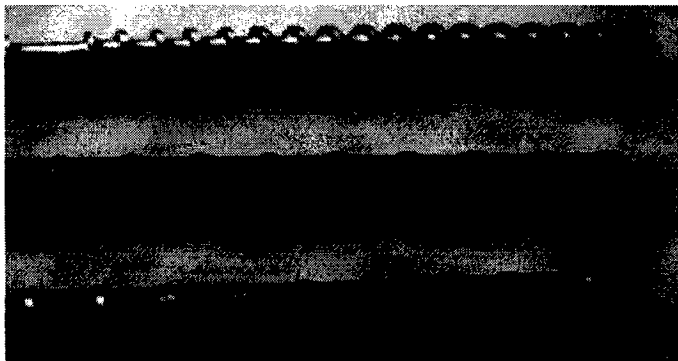


Figura 10. Imagen de tres husillos para un extrusor, husillo convencional, para nylon, PBT respectivamente.

1.2.2 RELACIÓN DE COMPRESIÓN

La relación de compresión es probablemente el término más usado en la terminología de diseño de tornillos, aunque no por eso es el mejor aplicado ni el mejor comprendido. La mayoría de la gente acepta la definición de relación de compresión.

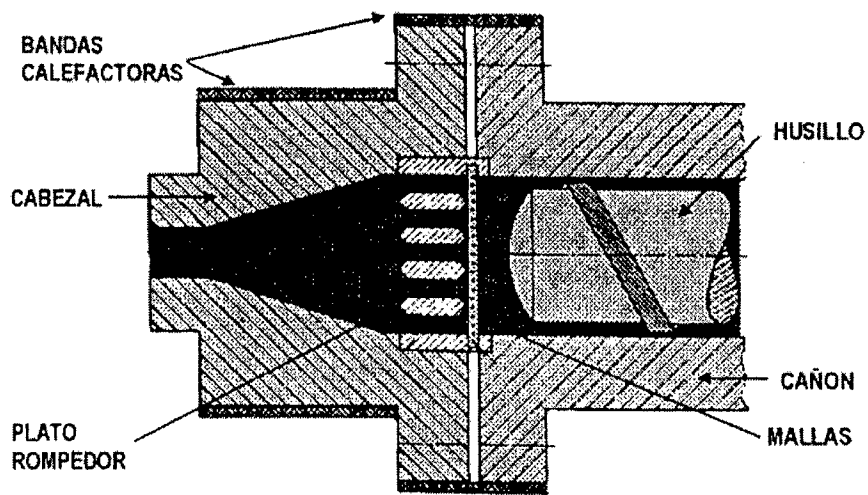
$$\text{Relación de compresión} = h_f / h_i$$

Donde: h_f . volumen de la última vuelta (profundidad del dado)
 h_i . volumen de la primera vuelta (profundidad de la tolva)

Siendo esta la relación entre el volumen de la primera vuelta (canal del husillo en la zona de la tolva) y el volumen de la última vuelta (canal del husillo en la zona de bombeo), por lo general esta va desde 2:1 a 4:1. Para elastómeros y hules termoplásticos se recomienda muy baja relación de compresión 1:1, porque solo reblandecen sin llegar a fundir.

1.3 CABEZA DEL EXTRUSOR Y DADO

Al final de la zona de dosificación, está localizado el dado y puede encontrarse unido al extrusor directamente o mediante un adaptador, por lo que también es muy común incluir un plato rompedor. (Figura 11)



ELIMINA EL FLUJO EN ESPIRAL DEL PLASTICO

SOPORTA LAS MALLAS O TAMICES

Figura 11. Esquema de un dado y cabezal del extrusor.

1.3.1 PLATO ROMPEDOR

Este es un disco grueso con una serie de orificios a través de los cuales pasa el plástico fundido. Este nos sirve para reducir o eliminar el movimiento circular de extruido, así como para homogeneizar la temperatura del fundido a la entrada del dado, así como soporte de los filtros o mallas que se pueden adicionar antes del dado. (Figura 12)

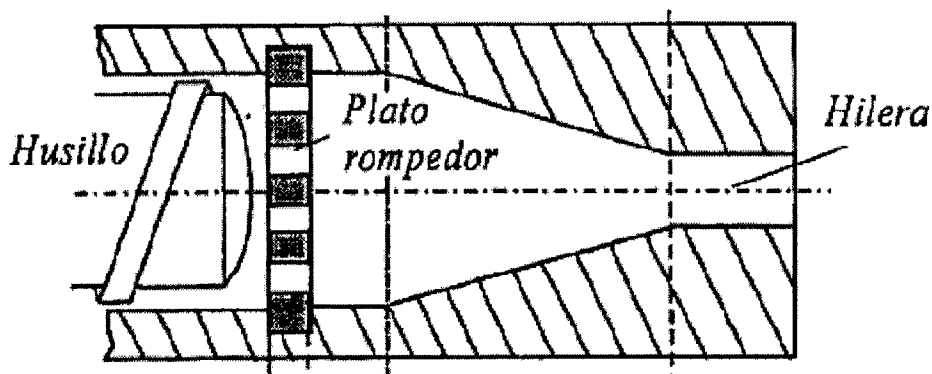


Figura 12. Esquema de un dado con el plato rompedor.

1.3.2 MALLAS O FILTROS

Estas son telas de alambre especial que sirven para no dejar pasar los geles, grumos u otras partículas que pueda traer el plástico fundido, algunas se utilizan también para incrementar la presión en el extremo del dado. (Figura 13)

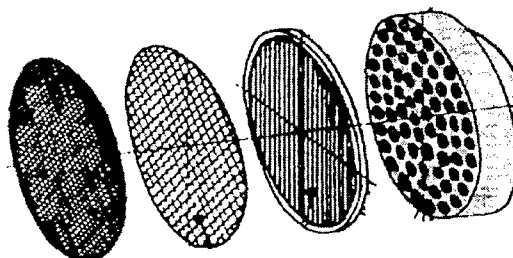


Figura 13. Esquema de las Mallas que se emplean en un extrusor.

1.3.3 ADAPTADOR

Esta pieza se coloca entre el barril del extrusor y el dado, ya que se utiliza para unir la salida del barril con la entrada del dado, permitiendo así un flujo suave y constante.

1.3.4 DADO

Los dados son aditamentos que se colocan en el extremo final del extrusor y son los responsables de la forma final del producto deseado.

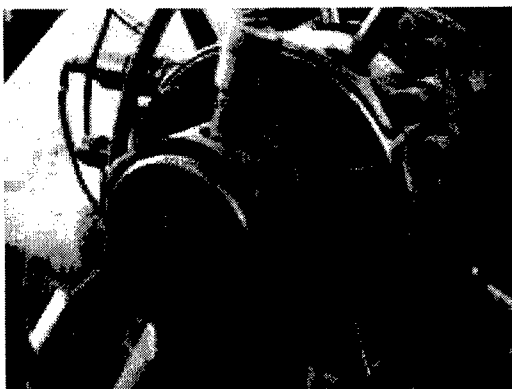


Figura 14. Fotografía de un dado al final de una máquina de extrusión.

La alta presión que experimenta el polímero antes del dado, ayuda a que el proceso sea estable y continuo, sin embargo, el complejo diseño de los dados es responsable en mayor grado de esta estabilidad. (Figura 14)

La geometría del dado suele ser diferente a la del producto final, esto es debido a la memoria que presentan los polímeros, esfuerzos residuales y orientación del flujo originado por el arrastre del material a través del husillo.

Existen diferentes diseños de dados, estos pueden ser para tubos, para láminas y perfiles de complicadas geometrías, cada uno tiene características de diseño especiales que le permite al polímero adquirir su forma final evitando los esfuerzos residuales en la medida de lo posible.

Los dados diseñados para extruir polímeros presentan diferencias significativas respecto a aquellos dados para extruir metales. Ya que los metales permiten ser procesados con esquinas y ángulos estrechos, en cambio los polímeros tienden a formar filos menos agudos debido a sus características moleculares, por ello es más eficiente el diseño de un dado con geometría de ángulos suaves o formas parabólicas e hiperbólicas.^[3]

Orientación y cristalización

Las láminas o perfiles formados al salir del dado comienzan a enfriarse inmediatamente, en ese momento cuando el extruido es jalado, se logra una mayor orientación longitudinal de las moléculas, originados por la fuerza de extensión aplicada.

A la salida del dado inicia el proceso de cristalización, el cual puede ser controlado mediante el grado de extensión y la velocidad de enfriamiento. La cristalización puede aumentar por extensión gracias a rodillos que estiran el material, esta fuerza causa que las moléculas se orienten en la dirección en que el material es forzado y esta orientación incrementa el grado de cristalinidad y por lo tanto su grado de resistencia. Esta técnica es utilizada típicamente en extrusión de láminas, películas y fleje.

1.4 COMPORTAMIENTO DEL PLÁSTICO DURANTE LA EXTRUSIÓN

1.4.1 FLUJO A TRAVÉS DE UN CANAL SIMPLE Y DE CANAL RECTANGULAR

Canal simple: Para modelar el flujo de polímero que fluye a través de un canal es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- En las paredes del canal el flujo es igual a cero
- El fluido fluye constante independientemente del tiempo
- En todo lo largo del canal, el perfil de flujo permanece constante
- El fluido es incompresible
- El flujo es isotérmico
- La fuerza de gravedad es despreciable

Primero consideramos un material que fluye a través de un canal de sección transversal circular con un flujo parabólico:

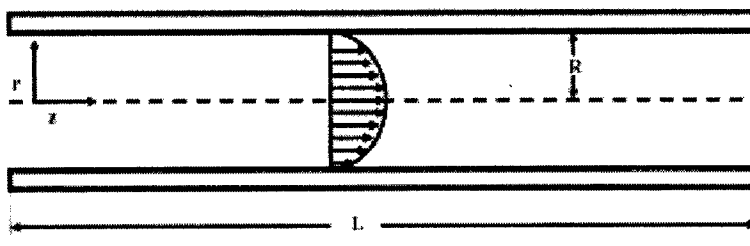


Figura 15. Flujo a través de un canal de sección transversal.

después de un balance de momentum se obtiene que:

$$V_z \neq 0, V_r = V_\theta = 0$$

después de una análisis matemático se obtiene que el esfuerzo cortante σ_{rz} :

$$\sigma_{rz} = \frac{r \Delta P}{2L}$$

y finalmente, tomando en cuenta la ley de Newton de la viscosidad, el flujo volumétrico y la velocidad promedio, se obtienen las siguientes ecuaciones: para esfuerzo cortante σ y velocidad de corte $\dot{\gamma}$:

$$\sigma = \frac{H \Delta P}{2L}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{6Q}{\omega H^2}$$

Canal rectangular: Para fluidos newtonianos a través de un canal rectangular tenemos:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{L} x$$

Substituyendo la ley de la potencia, integrando y substituyendo el flujo volumétrico Q se obtiene:

$$\frac{H \Delta P}{2L} = K' \left(\frac{6Q}{\omega H^2} \right)^n \quad \text{o también:} \quad \sigma = K' \dot{\gamma}^n$$

1.4.2 ÍNDICE DE FLUIDEZ

El estudio del índice de fluidez (MFI) de un material termoplástico, facilita el seguimiento de la calidad de una materia prima o un producto terminado, colaborando así en el proceso productivo.

Este es el peso del material que fluye 10 min., este es forzado a pasar a través de un orificio normalizado a condiciones de peso y temperatura especificadas. Las unidades de medida son gramos/10 minutos y los resultados se expresan:

$$\text{MFI} = 2.3 (190,2160)$$

Equipo. un medidor de índice de fluidez es básicamente un cilindro para extrusión situado en posición vertical, por el interior del cual desciende un pistón que lleva un peso en el extremo superior y en el extremo inferior del cilindro existe un cabezal con un orificio de diámetro normalizado y conocido, como se muestra en la siguiente figura:

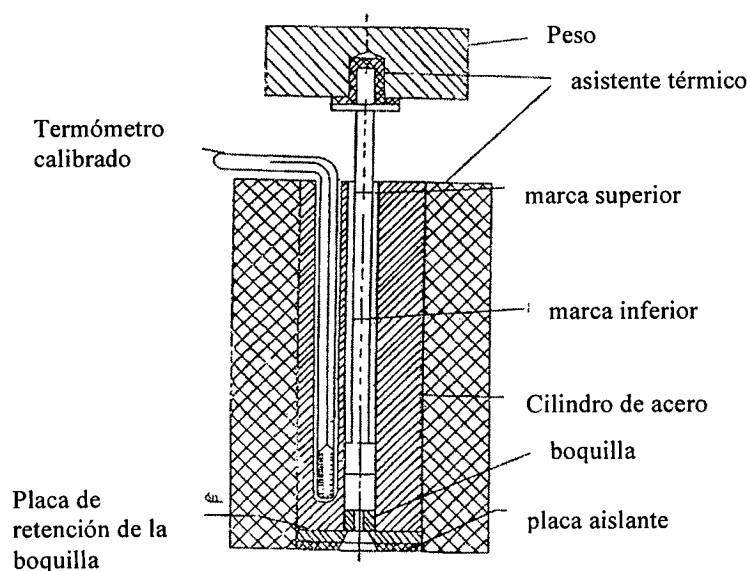


Figura 16. Esquema de un medidor de índice de fluidez.

Para medir el MFI se llena el cilindro con el material termoplástico y a continuación se introduce el pistón al cual se le agrega el peso correspondiente en su extremo superior. Transcurrido el tiempo de precalentamiento el termoplástico fluirá a través del orificio situado en la parte inferior del barril en ese instante se realiza un corte de la extrusión y se pone en marcha el cronómetro como inicio del tiempo de los cortes, posteriormente se toman las muestras de los cortes al tiempo especificado ó establecido de acuerdo a la cantidad de material que sale por el orificio.

Para determinar el índice de fluidez se utiliza la relación:

$$\text{MFI} = \frac{t_r W}{t}$$

- Donde: t_r . tiempo de referencia (10 min.)
 t . intervalo de tiempo de cada corte
 W . peso promedio de los trozos obtenidos en los cortes

Para la realización de la determinación del índice de fluidez en forma automatizada se requiere un equipo que tenga dicha capacidad, el cual utiliza el valor de la densidad del material fundido y determina el volumen del material desplazado por el pistón en un determinado tiempo, se conoce la dimensión del barril y se determina el desplazamiento del barril y el tiempo transcurrido para desplazar dicho volumen, aplicando la siguiente relación:

$$\text{MFI (g/10 min.)} = (426)(L)(d)/t$$

- Donde: L . longitud de desplazamiento del pistón dentro del barril
 D . densidad del material en estado fundido (el pistón al desplazarse 2.54mm (1 pulgada) dentro del barril desaloja 1.804 cm de resina, por la relación, densidad de la resina a la temperatura de prueba = masa de la resina extruida/1.804)
 T . tiempo en que tardo el pistón en el desplazamiento
426. promedio de áreas de pistón y cilindro por 60 segundos.

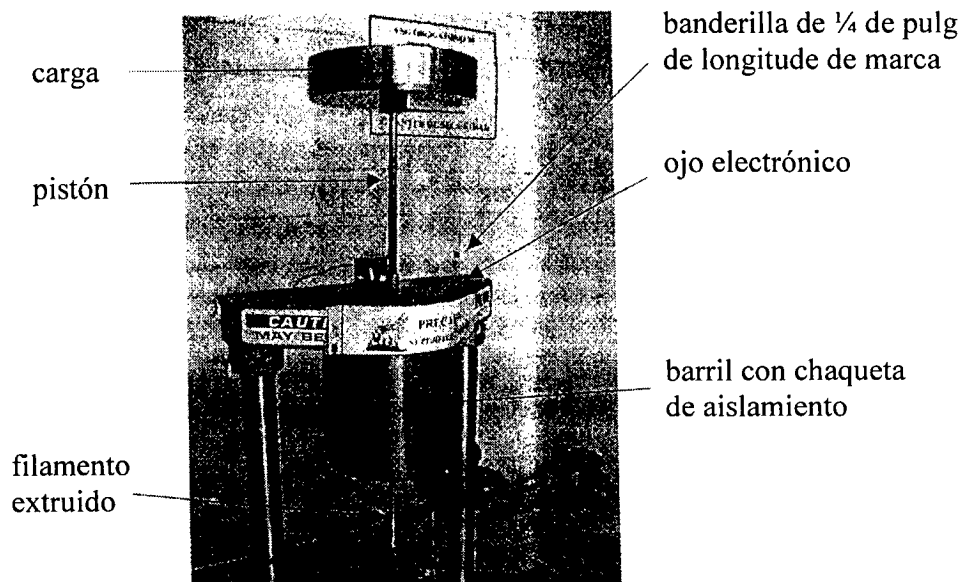


Figura 17. Fotografía de un medidor de índice de fluidez.

Normas y Métodos:

La determinación del índice de fluidez está estandarizada en la norma **ASTM D-1238**. Esta norma establece las dimensiones del orificio, temperatura de fusión, del material, diámetro del pistón y el método a seguir. El objetivo es conseguir resultados semejantes con diferentes medidores de índice de fluidez.

Se han desarrollado métodos para la medición de este, el método A es el tradicional, de corte manual de material y pesado de los segmentos, mientras que el método B utiliza el parámetro de la densidad de fundido y sensores electrónicos para determinar el desplazamiento del pistón dentro del barril para calcular el volumen del material desplazado y calcular automáticamente el índice de fluidez.

El método A se utiliza generalmente para medir valores de índice de fluidez entre 0.15-50 g/10 min., mientras que el método B se puede utilizar entre 0.5-12000 g/min.

1.4.3 REOMETRÍA Y REOLOGÍA

Los materiales plásticos en estado fundido se comportan como no-newtonianos, esto quiere decir que a mayor velocidad de flujo a través de un orificio su viscosidad disminuye, por lo tanto, la reometría capilar consiste en hacer pasar un plástico en estado fundido a través de un orificio pequeño, a diferentes velocidades constantes de flujo y observar como disminuye la viscosidad y que esfuerzo se requiere para mantener dicho flujo.

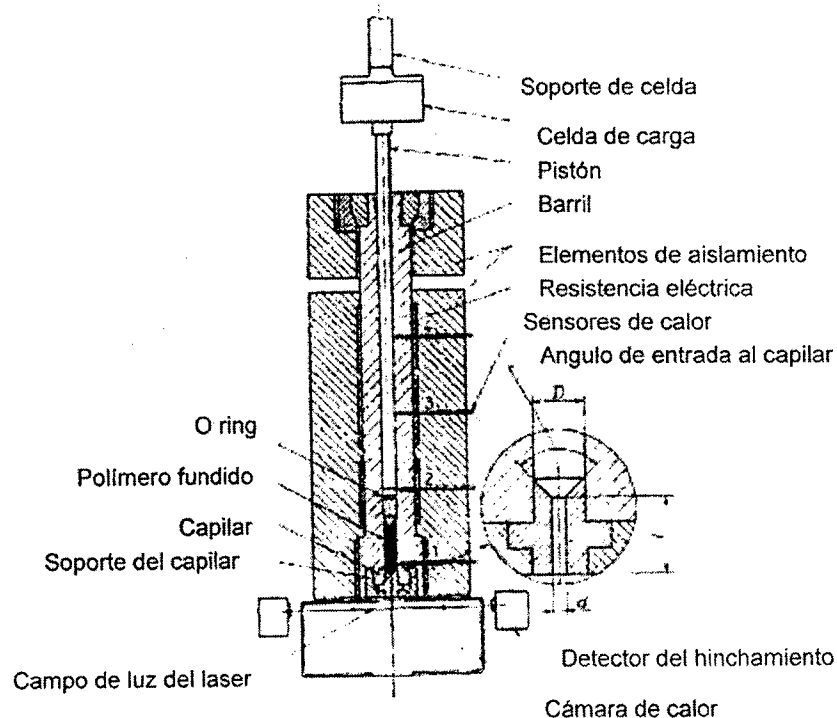


Figura 18. Esquema de un Reómetro Capilar.

Equipo. el reómetro capilar es un instrumento que se utiliza para la determinación de las propiedades del flujo de los materiales termoplásticos en estado fundido. Este equipo opera a velocidades de corte entre 10 y 10000 seg^{-1} y cubre el intervalo de las velocidades de corte que se presentan en proceso de extrusión e inyección y proporcionan información en forma grafica de como varia la viscosidad del material conforme se incrementa la velocidad de corte, así como, el esfuerzo necesario aplicado para incrementar dicha velocidad de corte.

El reómetro capilar consiste de un cilindro con calentamiento eléctrico, en cuyo extremo inferior se coloca un dado capilar, a través del cual se hace pasar el plástico fundido. El pistón viaja a velocidad constante, forzando al plástico a pasar a través del capilar y se mide la fuerza que se necesita aplicar para lograr la velocidad seleccionada.^[4]

En este modelo de reometría se considera que el esfuerzo cortante tiene una relación directa con la caída de presión ΔP que se presenta a lo largo del tubo capilar, donde su longitud L y su radio R se relacionan con el flujo volumétrico Q y el esfuerzo cortante σ a la salida del dado del reómetro capilar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{R \Delta P}{2L}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

Usualmente se aplica una fuerza F o una velocidad conocida con el fin de que el pistón

empuje al polímero fundido y representando matemáticamente por:

$$\Delta P = \frac{F}{A}$$

Para ajustar estas relaciones con los esfuerzos cortantes se utiliza la corrección de Bagley, mediante la cual se ajustan los efectos de la caída de presión del pistón a través de la longitud del tubo capilar, es necesario considerar la viscosidad del material y la caída de presión a la entrada del capilar.

Resultando en:

$$\sigma = \frac{\Delta P_{Piston}}{2(L/R + e)}$$

Donde:

e = valor obtenido al graficar ΔP_{Piston} contra (L/R) en la intersección de la recta obtenida con el eje de las abscisas.

η . Viscosidad, obtenida de la pendiente (derivada) de la gráfica de $\Delta P_{\text{Pistón}}$ contra (L/R) .

Otras correcciones incluyen la corrección de Rabinowitsch aplicada a fluidos no newtonianos, con la cual se obtiene:

para la velocidad de corte:
$$\dot{\gamma} = \frac{3n + 1}{4n} \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right)$$

y
$$n = \frac{d \log(R \Delta P_{\text{Piston}} / 2L)}{d \log(4Q / \pi R^3)}$$

El estudio de la reometría capilar es muy importante para conocer las características reológicas del material a utilizar, además se pueden conocer algunos otros datos importantes como hinchamiento, distorsiones del extruido, pérdida de viscosidad con el tiempo.

Obteniendo graficas de la siguiente manera:

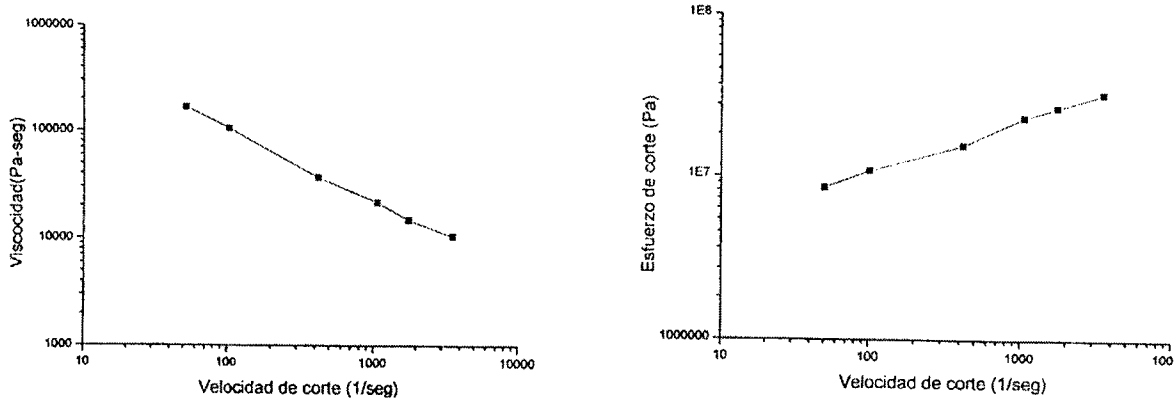


Figura 19. Graficas de Reometría Capilar, Velocidad de corte vs. Viscosidad y esfuerzo de corte respectivamente.

Este tipo de determinaciones proporciona una mayor información del comportamiento del material que el índice de fluidez. En muchas ocasiones diferentes materiales pueden presentar índice de fluidez semejante y se introducen al proceso ocasionando problemas en el procesado, sin conocer que se trata de un material diferente, pero con una

determinación de reometría capilar se puede conocer si se trata del mismo material o de otro con índice de fluidez semejante.

El índice de fluidez se puede considerar un punto de la curva de comportamiento del material fundido, por ese punto pasa muchas curvas, por esta razón se recomienda que además de la determinación del índice de fluidez, de ser posible se determine el comportamiento del material en estado fundido por reometría capilar para tener un mejor control de la materia prima.

Normas y Métodos:

La prueba de reometría capilar está estandarizada en la **ASTM D-3835**. Esta norma establece las dimensiones del barril y pistón, la temperatura de prueba de los materiales más comunes, el procedimiento a seguir de llenado del barril y el tiempo de precalentamiento del material antes de iniciar la prueba. El objetivo es conseguir resultados semejantes con diferentes reómetros capilares.

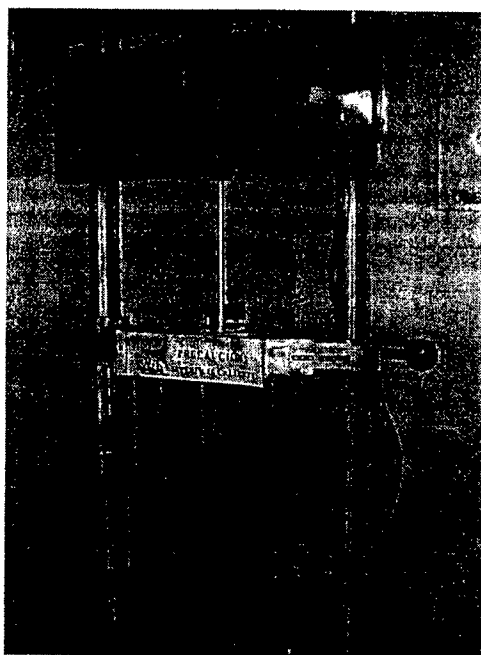


Figura 20. Imagen de un Reómetro Capilar.

1.4.4 FUSIÓN DEL POLÍMERO

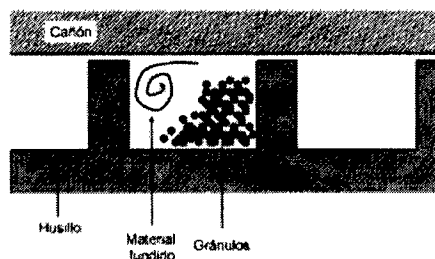


Figura 21. Esquema del mecanismo de fusión del material plástico.

El polímero funde por acción mecánica en combinación con la elevación de su temperatura por medio de calentamiento del cañón. La acción mecánica incluye los esfuerzos de corte y el arrastre, que empuja el polímero hacia la boquilla e implica un incremento en la presión.

La primera fusión que se presenta en el sistema ocurre en la pared interna del cañón, en forma de una delgada película, resultado del incremento en la temperatura del material y posteriormente también debida a la fricción. Cuando esta película crece, es desprendida de la pared del cañón por el giro del husillo, en un movimiento de ida y vuelta y luego un barrido, formando un patrón semejante a un remolino, o giro rotatorio sin perder el arrastre final. Esto continúa hasta que se funde todo el polímero.

Fusión y arrastre: Si el material se adhiere al husillo y resbala sobre la pared del cañón, entonces el arrastre es cero, y el material gira con el husillo. En cambio, si el material no resbala con la pared del cañón y resbala con el husillo, entonces el arrastre es máximo y el transporte de material ocurre.

En la realidad el polímero experimenta fricción tanto en la pared del cañón como en el husillo, las fuerzas de fricción determinan el arrastre que sufrirá el polímero

Teniendo en cuenta que algunos polímeros funden exactamente en el sentido opuesto debido a sus características moleculares, esto ha dado origen al diseño de algunos husillos específicos.

1.5 TÉCNICAS DE EXTRUSIÓN

Debido a la flexibilidad del proceso de extrusión con la implementación de algún aditamento al final del extrusor, se puede encontrar la siguiente clasificación:

Extrusión:

- Extrusión con un sólo husillo
 - Extrusores convencionales o típicos
 - Extrusores con ventilación (venteo) o degasificación
 - Extrusores mezcladores

- Extrusores sin husillo
 - Bombas
 - Extrusores de discos

- Extrusores de husillo múltiple
 - Extrusores de doble husillo
 - Husillos que no engranan
 - Husillos que engranan

 - Rotación en el mismo sentido
 - Rotación en sentido inverso

 - Extrusores con más de dos husillos
 - Husillos o Tornillos planetarios
 - De 4 husillos (construcción particular para cada máquina)

1.5.1 EXTRUSORES MONOHUSILLO

Los extrusores más comunes utilizan un sólo husillo en el cañón (barril). La división más común para extrusores de un sólo husillo consiste en 4 zonas:

1. *Zona de alimentación:* En esta parte ocurre el transporte de gránulos sólidos y comienza la elevación de temperatura del material
2. *Zona de compresión:* En esta zona, los gránulos de polímero son comprimidos y están sujetos a fricción y esfuerzos cortantes, se logra una fusión efectiva
3. *Zona de distribución:* Aquí se homogeniza el material fundido y ocurren las mezclas.
4. *Zona de mezcla:* En esta parte que es opcional ocurre un mezclado intensivo de material, en muchos casos no se aconseja porque puede causar degradación del material.

Los husillos pueden tener también dentro de algunas de sus zonas principales elementos dispersivos y elementos distributivos.

Distribución: Logra que todos los materiales se encuentren en igual proporción en la muestra.

Dispersión: Logra que los componentes no se aglomeren sino que formen partículas del menor tamaño posible.

1.5.2 EXTRUSORES DE DOBLE HUSILLO

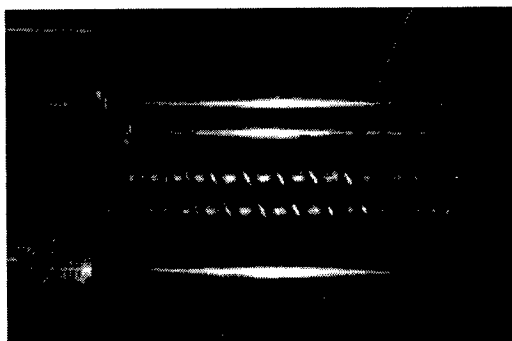


Figura 22. Fotografía de un extrusor Doble Husillo.

Los extrusores de doble husillo presentan algunas ventajas sobre los monohusillos pues proporciona un empuje mucho mayor que el de un sólo husillo, ya que presentan aceleraciones de material mayores, manifiestan esfuerzos cortantes relativamente altos y logran mezclados intensivos. Para algunos materiales sensibles, este proceso es demasiado agresivo, por lo cual resulta inadecuado, ya que algunos de los concentrados de color se realizan en su mayoría en este tipo de extrusores, sin embargo, la mayoría de los pigmentos sufren degradación debida a las condiciones agresivas del proceso.

Existen dos tipos de extrusores doble husillo: los que engranan y los que no engranan, a su vez los que engranan pueden presentar dos posibilidades, los co-rotativos y los contra rotativos, dependiendo de las direcciones en las que estos giran.

El flujo generado en un doble husillo con engranaje de tipo contra rotativo genera un flujo en forma de C el cual tiene las características de un bombeo positivo, disminuyendo drásticamente la influencia de la viscosidad del material para su transporte y generando un bombeo más eficiente. La desventaja de este proceso es, que el husillo empuja al material plástico a las paredes del cañón (barril), lo que evita el uso de altas velocidades; también existe el problema del mezclado ineficiente, mientras más rápido se transporta el material, menos eficiente es el mezclado.

En los husillos con engranaje y co-rotativos, el flujo del material tiene mayor dependencia de su viscosidad, aunque mucho menor que en los extrusores de un solo husillo. En este tipo de arreglo los husillos no son empujados hacia la pared del cañón, por ello se permiten altas velocidades, además el material pasa de un husillo a otro logrando un flujo alternante que ayuda a una mezcla más homogénea.

1.5.3 CO-EXTRUSIÓN DE LÁMINAS Y PELÍCULAS

La co-extrusión de láminas y películas es una de las aplicaciones más importantes de la extrusión de polímero, por medio de esta tecnología es posible co-extruir una película con

un color de fondo y otro de frente o un arreglo tipo sándwich en el cual un material se encuentra en la capa intermedia y otro u otros en las exteriores.

Las láminas multicapas han sido comercialmente producidas desde dos a nueve capas, aunque es posible utilizar más capas, las aplicaciones no han exigido este desarrollo con mayor amplitud.

La co-extrusión de lámina puede llevarse a cabo mediante dos técnicas:

- Mediante el uso de un dado para extrusión multicapa, que permite dos o tres capas de polímero, pero presenta baja eficiencia y poca estabilidad.
- Mediante un dado con flujos que se encuentran distribuidos por medio de canales dosificadores. Por esta técnica es posible obtener diferentes capas con buena distribución y homogeneidad.^[5]

1.6 ZONAS DE MEZCLADO

Los equipos monohusillo no se distinguen por ser sistemas con buena capacidad de mezclado; normalmente, la resina recorre hasta tres cuartas partes del extrusor antes de encontrarse completamente fundida, y el trayecto restante resulta complicado para tener un mezclado intenso. Por esta razón no son adecuados cuando existe la necesidad de reducir el tamaño de partícula de aditivos que se hayan agregado, como en el caso de pigmentos en polvo, a esta función se le denomina dispersión.

Para lograr un mezclado adecuado y en caso de ser necesario una distribución efectiva, se cuenta con diversos diseños de zonas de mezclado, que son secciones del husillo con geometría especial para forzar al plástico a realizar patrones de flujo que permitan una homogeneización vigorosa y en algunos casos una molienda de los agregados del plástico para el mejor aprovechamiento de las cualidades de los aditivos incorporados.

Esta zona de mezclado se ubica en la última sección del husillo, normalmente conocida como zona de dosificación o bombeo. Aprovechando que el material en esta zona está completamente fundido, con una temperatura y una viscosidad adecuadas para los esfuerzos a la que será sometido el material.

Las zonas de mezclado se dividen en elementos de mezclado de dispersión y elementos de mezclado de distribución.

Elementos de mezclado de dispersión. Se utilizan cuando el proceso demanda la reducción o molienda de las partículas presentes, como en el caso de los aditivos en polvo o en las líneas de extrusión que tiene aberturas de dados pequeñas o estrechas, como en las películas, fibras y otros. Estos funcionan creando corrientes que obligan al plástico fundido a pasar por espacios de tolerancia muy estrecha entre el husillo y el barril, generando esfuerzos suficientes para romper partículas que se presentan en la masa fundida.

Tomando en cuenta que estas zonas provocan también un mayor desgaste con el barril, perdiendo efectividad cuando la reducción de paredes es mayor.

- Zona de mezclado Maddock
- Zona de mezclado Egan

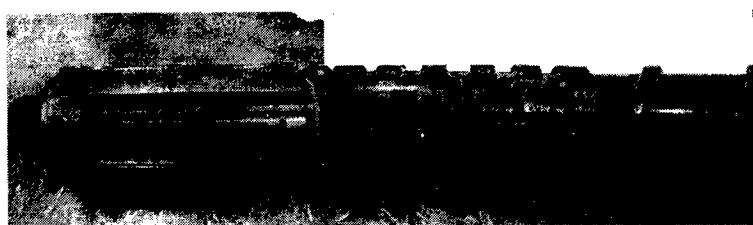


Figura 23. Fotografía de un husillo con zonas de mezclado que tiene una zona de pines y maddock.

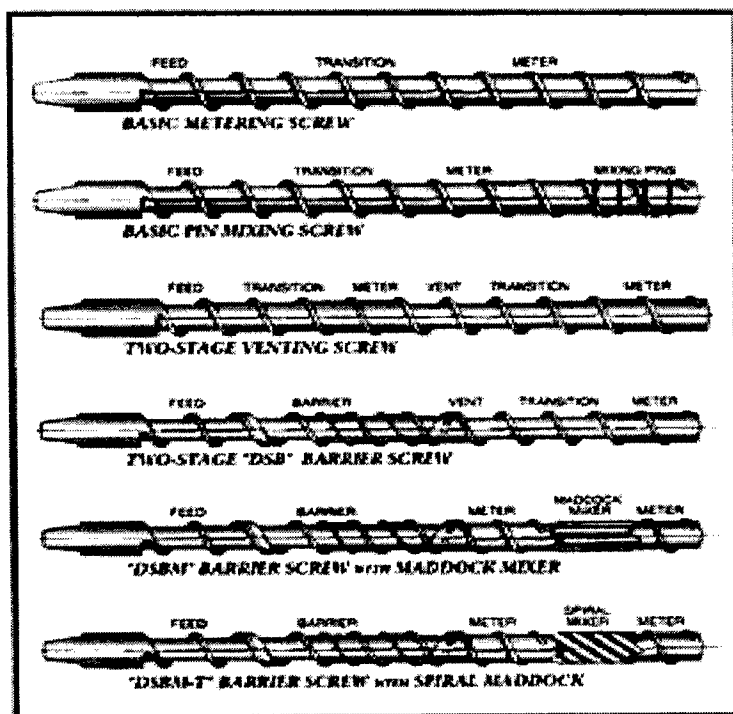


Figura 24. Imágenes de diferentes tipos de husillos con elementos de mezclado dispersivo.

Elementos de mezclado de distribución. Se utilizan cuando solamente se requiere de una homogenización de materiales, sea un aditivo en plástico o dos plásticos en una aleación. Se ayuda con elementos que causan los cambios de dirección del flujo, pero no efectos de corte como en el caso de elementos dispersivos. Incluso en casos de los pigmentos en perlas o refuerzos en forma de fibras se necesita que mantengan un tamaño de partícula, por lo que se deben manejar con tipo de husillos característicos para obtener estas propiedades:

- Zona de mezclado de Agujas (PIN MIXING)
- Mezclador Dulmage
- Mezclador Pineapple
- Mezclador de Cavidades de Transferencia (CTM)



Figura 25. Mezclador de Cavidades de Transferencia (CTM).

1.6.1 HUSILLOS ESPECIALES

El flujo del material dentro del extrusor depende de los ángulos que tengan los alabes y de la viscosidad del material transportado.

- Husillo sin zona de alimentación y sin zona de compresión. Utilizado particularmente para las poliamidas, debido a su corta ventana de proceso. Esto es debido a las características de flujo que presentan algunas resinas.
- Husillo de paso variable. Usado en la industria hulera, con profundidades en los alabes considerablemente grandes para evitar la generación de calor por los esfuerzos cortantes.

Para que el procesamiento del LLDPE se recomienda la modificación de la geometría del husillo y el barril, utilizando un claro entre alabes y cilindro con el valor del doble al recomendado en extrusores normales.

- *Husillo convencional.* Utilizado para casi todas las poliolefinas, teniendo tres zonas (alimentación, transición y bombeo).

1.7 EXTRUSIÓN SOPLO

La fabricación de película tubular es un proceso altamente especializado, que requiere de un número esencial de componentes. Todos estos deben funcionar de manera coordinada para generar un producto de calidad. Ya que la extrusión de película es un proceso

continuo, cada una de las partes de la línea deben funcionar a la velocidad adecuada para mantener el proceso con la mayor productividad.

De todos los procesos de extrusión, la película tubular es el que requiere de un mayor espacio en sentido vertical, ya que dependiendo del diámetro del producto, la altura de la línea puede ser desde un metro para aplicaciones de laboratorio, hasta 25 metros o más para aplicaciones industriales.

1.7.1 MAQUINA EXTRUSORA

La selección de un extrusor para producción de película es una etapa muy importante antes de iniciar una fabricación. Aunque el término película se refiere muchas veces a un solo producto, en realidad existe una gran variedad de películas con diferentes propiedades de apariencia, mecánicas, térmicas, etc., que son procesadas cada una de manera especial.

Es por esta razón que los extrusores para película deben ser apropiados para el trabajo que va a realizar, escogiendo un diámetro de husillo adecuado para el volumen de producción deseado, la geometría y tratamiento superficial del husillo según la materia prima empleada, sistemas de calentamiento que proporcionen las temperaturas de proceso adecuadas, entre otro tipo de consideraciones.

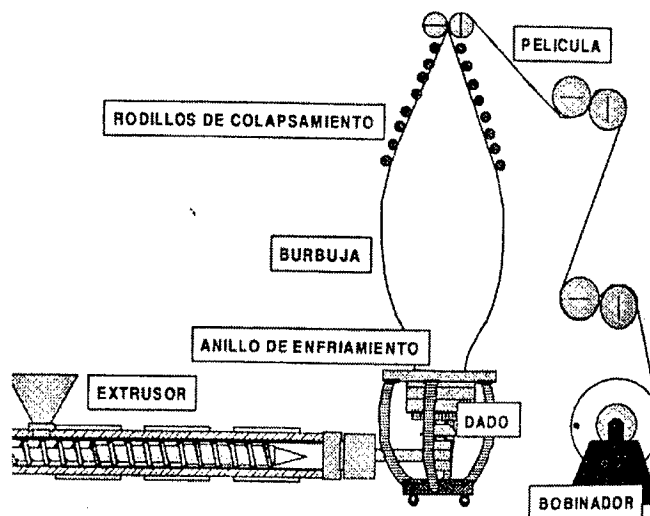


Figura 26. Esquema de una maquina de Extrusión Soplo (componentes).

Características Generales de los extrusores para la fabricación de Película Tubular

DIÁMETRO EXTRUSORA mm	VELOCIDAD DE ROTACIÓN / rpm		CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN / Kg/h	
	MEDIA	MÁXIMA	MEDIA	MÁXIMA
45	80	100	20	30
60	90	180	65	130
75	90	150	80	150
90	80	150	135	225
170	70	100	280	400
150	70	100	370	530
200	90		990	

Tabla 1. Características generales de los extrusores para fabricación de película tubular.

1.7.2 DADO O CABEZAL

El dado es el elemento de la línea que define la calidad mecánica y de apariencia de la película. Su función principal es tomar el flujo del material plastificado que proviene del extrusor y moldearlo hasta salir por un anillo estrecho con una abertura aproximada de 0.6 a 2.8mm que conforma la película. Internamente el dado está diseñado para eliminar todas las líneas de unión que se producen durante el paso del plástico para la formación de la burbuja.

El diseño más común es el distribuidor helicoidal, que consiste en una serie de ranuras espirales ascendentes que funcionan como un mezclador estático que desvanece eficientemente las líneas de unión que inevitablemente se forman cuando el plástico toma la forma de un anillo circular.

La construcción de los dados helicoidales debe realizarse con suma precisión, ya que problemas en el maquinado que originen el descentrado del mandril con la parte externa del dado generarán películas con diferencias de espesores y consecuentemente no se podrá cumplir con especificaciones estrictas que los compradores de material de empaque requieren. Las películas con espesores no uniformes presentan una apariencia irregular,

propiedades mecánicas no uniformes a lo largo de la película y dificultades con la impresión y el sello son otras propiedades afectadas por este defecto. (Figura 27)

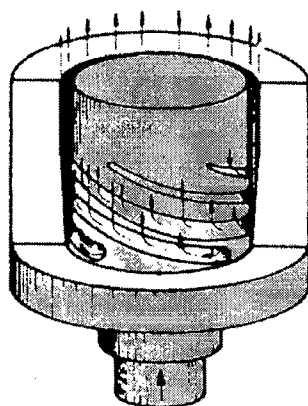


Figura 27. Esquema de un dado para Extrusión Soplo.

Ante la necesidad de películas con mayores propiedades de barrera, resistencia y bajos costos, principalmente para aplicaciones de empaque, las necesidades de películas co-extruidas se encuentra en aumento, al igual que los equipos con dados para múltiples capas.

Tradicionalmente los dados para co-extrusión de película tubular tienen diseños inflexibles, con configuraciones que no pueden cambiar.

Sin embargo, nuevos diseños de dados denominados modulares o apilables, pueden adaptarse para hacer cambios en el número de capas y estructuras con relativa facilidad, alcanzando películas con un diseño de hasta ocho capas.

Cabezales de Alimentación Central

La alimentación al cabezal se efectúa mediante la dosificación de materia, que llega a través del canal de alimentación y se reparte alrededor del núcleo por medio de la pieza porta-núcleo llamada torpedo, que se encuentra en la pieza de unión. Las características

de esta pieza se ajustan a diversos tipos de diseño, esto depende de los fabricantes del cabezal.

Las ventajas que presenta este tipo de alimentación son las siguientes:

- a. El film tubular no presenta línea de soldadura
- b. Buen control del espesor de la película
- c. Tiene una rápida limpieza del material

Cabezales de Alimentación Lateral

En este caso el material fundido llega a la base del porta-núcleo, lateralmente a través de un canal circular y se reparte alrededor del mismo. Este sistema obliga al material a recorrer una trayectoria demasiado larga hasta alcanzar el punto opuesto al de la entrada, para disminuir este inconveniente, existen los siguientes:

- a. Alimentación sobre el núcleo, en el que el canal de alimentación tiene forma de corazón.
- b. Alimentación tangencial, en donde la materia se reparte por medio de un canal de distribución alrededor del porta-núcleo.

Estos tipos de cabezales presentan ángulos inconvenientes tales como:

- a. Aparición de una línea de soldadura, que produce fragilidad de la película a lo largo de la misma.
- b. Tiempos de purga muy largos especialmente cuando se trabaja con colores.

Cabezal para Extruir a dos Colores

Este es un tipo de cabezal clásico de doble alimentación lateral, el cual se conecta a dos extrusoras situadas en sentido opuesto que utilizan pellets de diferentes colores. Cuando

la velocidad de alimentación de ambas máquinas es idéntica, los dos flujos de materia fundida se unen en el dado originando generatrices en la bobina, sin embargo, al trabajar a velocidades diferentes se obtienen bandas de diferente color y ancho regulable. Si se desea conseguir una delimitación muy concreta de colores, el ancho de la banda coloreada puede a veces variar sensiblemente a lo largo de la fabricación.

Cabezales para Co-extrusión

Cabezal de doble alimentación, el cual recibe ambos flujos de materia fundida a alturas diferentes, igual que en el caso anterior se conecta a dos extrusoras situadas en sentido opuesto. Un núcleo especial de doble pared, permite que los flujos se unan en el último tramo del dado, de 5 a 10 mm de la salida.

Esta técnica permite la fabricación de bobinas a dos capas de distinto color en el interior/exterior, así como bobinas complejas, formadas cada capa por un tipo de termoplásticos diferente.^[7]

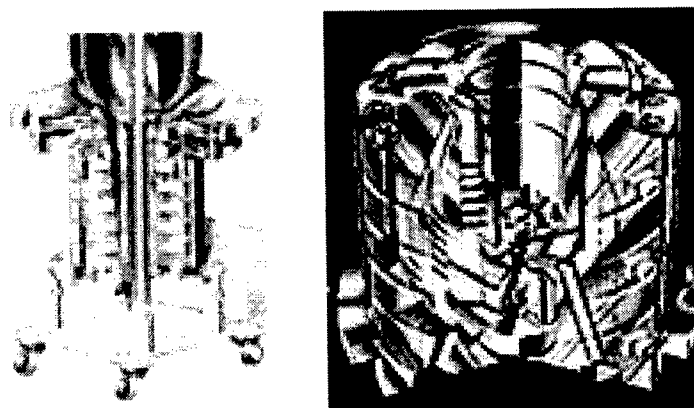


Figura 28. Diagramas transversales de dados de película.

1.7.3 ANILLO DE ENFRIAMIENTO

Este tiene la función de reducir drásticamente la temperatura de la película recién extruida (190-230°C en el caso de los Polietilenos), hasta estabilizarla dimensionalmente (90-120°C).

A pesar de que el enfriamiento de la película es su primordial función, esto lo debe realizar con ciertas características específicas, primero el enfriamiento debe ser muy uniforme para generar una temperatura perimetral prácticamente igual en toda la superficie de la burbuja. Para esto se requiere que los labios estén calibrados en toda la superficie de la burbuja. Además, se requiere que los labios sean perfectamente concéntricos con el anillo de salida del plástico, para enfriar periféricamente el material desde la misma distancia e intensidad. Los mismos labios del dado deben ser concéntricos para tener un flujo uniforme, ya que a mayor flujo, mayor será la capacidad de remoción de calor.

Por otro lado, el motor del ventilador o soplador debe funcionar sin variaciones en el rotor, ya que generaría variaciones de flujo que pueden provocar anillos de enfriamiento no uniforme sobre la burbuja, deformando permanentemente el producto. Se deben evitar las partículas suspendidas en el aire de enfriamiento que pudieran incrustarse en el plástico reblandecido, como pueden ser polvos o partículas mayores.

En este caso, deben colocarse filtros adecuados en la succión de aire para prevenir a la película terminada de una mala apariencia. El flujo de aire debe ser controlado, ya que una misma línea de película puede generar productos de diferentes anchos y espesores y el mismo anillo debe funcionar en todos los casos.

Normalmente, el aire no entra al anillo en un solo punto, sino que debe suministrarse en toda la periferia del anillo al menos en cuatro puntos o incluso más.

La alimentación del aire se realiza por medio de mangueras, comúnmente corrugadas para evitar posibles colapsamientos. Es muy importante verificar que no se presenten fugas de aire por perforaciones en la manguera o por malos acoplamientos.

Si una manguera sufriera un desperfecto debe sustituirse completamente si es posible, ya que las reparaciones o añadiduras pueden provocar caídas de presión en una parte del anillo y con esto genera un enfriamiento no uniforme.

Existen diferentes geometrías de anillos en función de la forma en la que sale el aire para enfriar la película. Así, se pueden encontrar anillos de enfriamiento externo de uno o dos labios.

El primero tiene las ventajas de ser más sencillo, mayor facilidad en la limpieza y menor costo de adquisición. El anillo de dos labios genera dos corrientes escalonadas diferentes sobre la película, presentando mayor eficiencia con el mismo gasto de aire a comparación del anillo de un labio.

El costo de los anillos de dos labios es mayor, pero podría requerir de un ventilador de menor capacidad gracias a su mayor eficiencia, equilibrándose finalmente en los costos totales. Debido a que el HDPE se procesa con un cuello de burbuja muy alto, se requiere de una corriente de aire prácticamente paralela al eje de salida del plástico por el dado, recomendándose para este material los anillos de un solo labio.

Mientras mayor sea el anillo de enfriamiento, mayor será el número de mangueras de alimentación del aire que se requiere y su longitud. Todas las mangueras deberán tener la misma longitud y geometría, entendiéndose este último punto como el diámetro interno de la manguera. En anillos grandes se presenta un problema, ya que se vuelve más sensible si alguna de las mangueras se encuentra obstruida o rota. Como los sopladores para anillos grandes son más robustos, tienden a generar vibraciones cuando tienen problemas de lubricación o alineación. Las vibraciones no son benéficas para el producto y pueden generar desajustes en el mismo cabezal de extrusión.

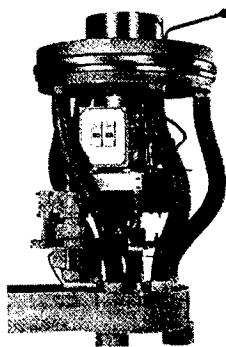


Figura 29. Imagen de un anillo de enfriamiento.

La mayor parte de las líneas de producción de película utilizan el aire ambiental para eliminar calor del plástico. Para aumentar la eficiencia se pueden utilizar sistemas de enfriamiento de aire, que ayudarán a una mayor productividad del equipo.

Estos sistemas trabajan por medio de radiadores metálicos por los que circula agua de chillers. Mientras el aire atmosférico puede variar desde 20 a 40°C dependiendo de la zona en la que se encuentre instalada la fábrica, la distribución y la densidad de la maquinaria, el aire frío puede llegar hasta 10°C o menos. Al enfriar la película con mayor rapidez se obtienen dos beneficios mayores; la productividad de la línea aumenta, ya que con altas velocidades de extrusión, la película se enfría eficientemente sin presentar problemas de bloqueo o deformaciones. También se observará una mejor transparencia de la película al evitar la formación de cristales que generan opacidad.

Los sistemas avanzados de aire frío requieren de instalaciones especiales para lograr la eficiencia deseada. Entre las recomendaciones más importantes se encuentra la de aislar el anillo, conexiones y conductos de aire para evitar ganancia del calor hacia el aire antes de llegar al anillo y eliminar las condensaciones de la humedad ambiental, que podría generar corrosión en el equipo y desperfectos en las partes eléctricas cercanas al enfriador.

Además de lograr ventajas con un enfriamiento externo por aire a baja temperatura, existe otro sistema que presenta ventajas similares o mejores. El sistema se denomina enfriamiento interno de burbuja, el cual consiste en dos corrientes independientes de enfriamiento, el anillo de enfriamiento externo convencional que elimina calor de la parte externa de la burbuja y adicionalmente un flujo interno a través del dado, que enfría primero la pared interna de la burbuja.

Este dispositivo puede utilizar aire a temperatura ambiente o en el mejor de los casos un sistema de enfriamiento de aire para la obtención de resultados óptimos.

Para el funcionamiento del sistema se requiere de una modificación en el dado que requiere un conducto central con dos vías concéntricas. Puesto que este conducto representará una interferencia al flujo del polímero para la formación de la burbuja, es importante señalar que el diseño es especial, siendo difícil adaptar un dado convencional para funcionar con enfriamiento interno de burbuja.

Los conductos centrales conducen aire de forma especializada. El conducto externo transporta el aire de enfriamiento de entrada y su longitud llega solamente a sobrepasar la superficie del dado, ya que inmediatamente el aire se libera para enfriar a la burbuja en su base. El aire de enfriamiento entra en contacto con la película recién salida de los labios y se calienta, ascendiendo por presión y temperatura. El segundo conducto o conducto central, presenta una altura mayor llegando aproximadamente hasta una parte media de la burbuja. Como se menciono anteriormente, el sistema de enfriamiento interno de la burbuja puede ayudar a un mejor desempeño de la línea, capacitándola a correr a mayores velocidades.

Cuando se extruye película a velocidades elevadas sin tener la capacidad suficiente de enfriamiento, el producto puede presentar defectos como: opacidad, presencia de olores por material degradado, bloqueo o adhesión temporal entre las caras de la película que impide, por ejemplo, abrir fácilmente una bolsa, así como otros problemas menores.

El bloqueo y la generación de olores no deseados se debe a que el polímero genera volátiles orgánicos de bajo peso molecular por efecto de las altas temperaturas del proceso. Estos volátiles se condensan en la superficie interna de la burbuja y se comporta como aceites viscosos.^[6]

El diámetro del anillo no debe de exceder en más de 5cm al del cabezal, evitándose en todo momento que exista circulación de aire entre ambos, para lo cual el anillo estará perfectamente centrado con el dado, debiendo estar la zona libre comprendida entre el

anillo y el cabezal (dado), cerrada herméticamente para evitar que el aire se caliente por efecto de este último.



Figura 30. Imagen de un anillo de enfriamiento.

Factores que influyen en la eficiencia del anillo de Enfriamiento

Distancia de soplado. Esta no debe de ser muy pequeña ya que produce perturbaciones, ni muy grande por que se vuelve ineficaz. Teniendo valores comprendidos entre 30 y 50mm.

Angulo de soplado. Consiste en la mayor y menor abertura del ángulo con que sale proyectada la corriente de aire, dependiendo de su valor para obtener condiciones óptimas de enfriamiento sin que se perjudique la estabilidad de la burbuja, de tal forma que si el ángulo es pequeño disminuye la eficiencia del enfriamiento y si este es muy grande, perturba la estabilidad de la misma. Siendo el ángulo de 35° el más eficaz.

Caudal de aire. Es una función del espesor de la película y de la velocidad del tiraje, aunque para un espesor dado el caudal es prácticamente una relación lineal de esta última.

Temperatura del aire. Para conseguir el máximo de eficacia de enfriamiento, es necesario aislar el anillo térmicamente del cabezal y utilizar así aire refrigerado a temperatura constante para evitar las fluctuaciones del ambiente.

Posición del anillo de enfriamiento. En el montaje del anillo se debe tener un especial cuidado en la parte horizontal y concéntrica con respecto al dado, ya que de lo contrario es difícil de conseguir espesores relativamente uniformes en la burbuja.

Anillos Rotatorios

Ya que el flujo del aire no es fácil de controlar totalmente, esto unido a un mal control del dado, produce como consecuencia una variedad de espesores que da lugar a las imperfecciones en la bobina, estos son los causantes de una deformación permanente que es perjudicial para obtener una buena impresión. Par evitar este inconveniente, es necesario utilizar un anillo rotatorio, el cual reparte esta diferencia de espesores helicoidalmente entorno a la bobina, para el caso de la rotación completa o sinusoidalmente en el caso de rotación incompleta alternante.^[7]

1.7.4 TORRE ESTRUCTURAL

La función principal es sostener los marcos de colapsamiento y a los rodillos de tiro a una distancia suficiente para que la burbuja termine con su enfriamiento.

Esta estructura, debe ser considerada como una parte de la línea, pues tiene una gran importancia en el aspecto funcional ya que debe de tener la rigidez para evitar vibraciones y movimientos que puedan afectar la calidad superficial de la película.



Figura 31. Imagen de una torre estructural.

1.7.5 ALTURA DEL TIRO

Es la distancia que existe entre el dado y la calandra de arrastre, siendo éste un parámetro muy importante ya que el enfriamiento de la burbuja se efectúa a lo largo de esta distancia y el efecto del bloqueo depende en gran parte de la misma, por lo que esta altura deberá ser en cada caso diferente y que la temperatura máxima con la que llegue la película a los rodillos de tiraje no sea superior a 45°C y esta en función de:

- temperatura del material a la salida del dado
- dimensiones de la burbuja
- espesor deseado
- producción por hora

En la siguiente tabla se dan algunas relaciones de las alturas convenientes para la fabricación de películas con diferentes dimensiones. Cuando se utilizan alturas elevadas se necesitan dispositivos guías que eviten las deformaciones de la burbuja, como consecuencia de las turbulencias que produce el aire de enfriamiento.

DIMENSIONES DEL TUBO		VELOCIDAD	VELOCIDAD DEL TIRAJE	ALTURA ÚTIL
ESPESOR EN μ	ANCHO EN mm			
30	800	70	28	5
		100	41	5.5
	400	20	16	4.5
		50	38	5
50	1.2	70	56	6
		70	10.5	4.5
		100	14	4.5
		150	21	5
	800	200	27	6
		70	16	5
		100	24	5.5
		150	31	6
		200	40	6.5

100	600	70	24	5.5	
		100	31.5	6	
		150	46.5	7.5	
	400	70	32	6	
		100	48	7.5	
		1.2	70	5.5	4.5
	150	800	100	7	4.5
			150	11	5.5
			200	13	5.5
		550	70	8	5
100			10.5	5	
150			15.5	6	
200			20	6.5	
200		3	70	9	5.5
			100	11	6
			150	15	7
	200		20	8	
	300		4.5	8	
	400		6	10	
500	8	10			

Tabla 1. Relaciones de Altura para diferentes dimensiones de películas.

1.7.6 PLANOS GUÍAS

Se encuentran situados inmediatamente debajo de la calandra de tiraje, teniendo forma rectangular y se encuentra uno enfrente del otro formando un ángulo comprendido entre los 20° y los 30°, de tal forma que la parte superior está prácticamente en contacto, teniendo una separación aproximada de 1 a 2cm.

El tubo extruido debe pasar entre estas dos placas convergentes, que son resbaladizas para evitar que se pegue la película, actuando al mismo tiempo como superficies de enfriamiento, aunque su efectividad dependerá del tipo de material de que estén construidas. Normalmente las superficies se encuentran recubiertas de plásticos fluorados, tablas de madera, etc., teniendo en cuenta que dependiendo del tipo de recubrimiento, la película se cargara con electricidad estática, detalle que se debe de tomar en cuenta para el proceso posterior.

1.7.7 CALANDRA DE TIRAJE

Está se encuentra compuesta por dos cilindros, en algunos casos uno de estos es de acero pulido y el otro de caucho duro, sin embargo, ambos pueden ser de caucho duro. Lo esencial es que estos ejerzan una presión de cierre uniforme, sin presionar en exceso a el tubo, especialmente en los pliegues laterales. La función principal de los cilindros de tiraje es controlar la velocidad de arrastre, la cual determina el espesor de la película. La velocidad de tiraje debe ser estable con el fin de obtener una bobina con dimensiones constantes, teniendo siempre presente que la velocidad deberá incrementarse progresivamente para no desequilibrar el espesor medio de la película.^[7]

1.7.8 EMOBINADORES

Debido al bajo espesor de las películas, así como de la flexibilidad de los polímeros utilizados para la producción de estas, es muy conveniente para su almacenamiento mantenerlas en forma de bobinas. La presentación en bobina es adecuada para la alimentación hacia otras máquinas como impresoras o borseadoras, que requieren un flujo constante de material para poder funcionar.

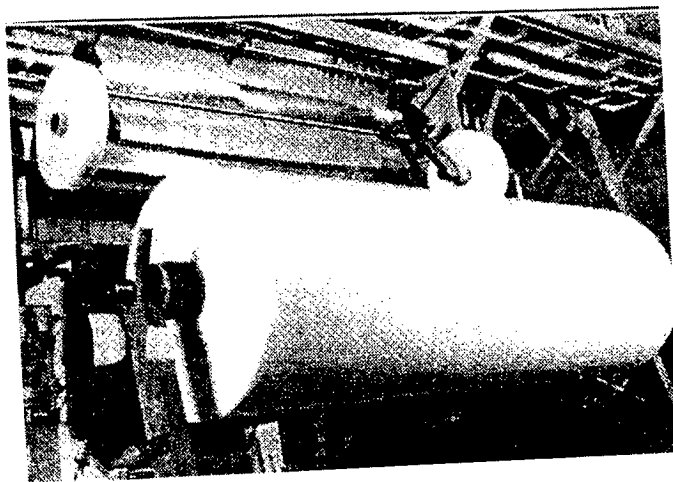


Figura 29. Imagen de una bobina de película plástica lista para la alimentación a otro proceso.

1.8 PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Dependiendo de los requerimientos del cliente se pueden establecer las propiedades de resistencia a la tensión, resistencia al rasgado o transparencia que pueden ser utilizadas en películas para uso agrícola, mientras que una película de empaque necesita propiedades semejantes pero adicionando un tratamiento superficial para llevar a cabo la presión. Por lo que se necesita tener un control antes y después para cumplir con los requerimientos del cliente.

1.8.1 MATERIA PRIMA

Como en la mayoría de los procesos de transformación es importante determinar desde un principio el tipo de material que se puede utilizar, ya que esta decisión dependerá de forma importante las características y desempeños del producto.

MATERIAL	ACRÓNIMO
Polietileno de alta densidad	HDPE, PEAD
Polietilén tereftalato	PET
Policloruro de vinilo	PVC
Polipropileno	PP
Polietileno de baja densidad	LDPE, PEBD
Polietileno lineal de baja densidad	LLDPE
Policarbonato	PC
Acetales	POM
Acrilonitrilo-butadieno-estireno	ABS
Elastomeros termoplásticos	TPE
Etil-vinil-acetato	EVA
Poliacrilonitrilo	PAN
Poliamidas	PA
Estireno acrilonitrilo	SAN
Polietileno de alta densidad y alto peso molecular	HMWHDPE

Tabla 2. Plásticos utilizados en Extrusión Soplo (de película y pieza hueca) por consumo.

1.8.2 ADITIVOS UTILIZADOS

Una variable que puede intervenir en el procesamiento y calidad de la película soplada es la adición de aditivos en el proceso. En términos generales, un aditivo no deberá influir sensiblemente en las propiedades mecánicas o físicas del producto final.

Sin embargo, algunos aditivos utilizados para la generación de películas degradables como el almidón y otro tipo de harinas, provocan una reducción de propiedades que pueden ser muy notorias en concentraciones elevadas. El abuso de aditivos de proceso como los agentes deslizantes o lubricantes pueden afectar la capacidad de impresión a pesar de que se tenga un tratamiento superficial adecuado.

Las películas de mLLDPE y de LLDPE de alto desempeño requieren aditivos que sean compatibles con la resina y se usan niveles mayores de ingredientes activos adicionados. Ya que desde la aparición de las resinas plastoméricas y de LLDPE para películas catalizadas con materiales metalocénicos, la industria ha tenido como objetivo optimizar el procesamiento de estas resinas, manteniendo siempre sus propiedades físicas y ópticas. Para lograrlo, ha recurrido a los aditivos, que desempeñan hoy un papel interesante, aunque todavía con algunas limitaciones.

Esto, porque aun no se ha desarrollado la química de los aditivos que permita obtener los requerimientos tan particulares necesarios en el procesamiento de las resinas metalocénicas para películas. Lo mismo puede decirse de otros grados de resinas de polietileno para películas que tienen atributos similares y que han surgido de otros sistemas diferentes a los de los catalizadores metalocénicos. Entre estos otros sistemas se encuentra los catalizadores mejorados de Ziegler-Natta.

No obstante, los fabricantes de resinas han venido trabajando de cerca con los proveedores de aditivos y concentrados para encontrar las formulaciones útiles de los

aditivos tradicionales como los agentes deslizantes, de antibloqueo, antiniebla, y diferentes ayudas de proceso.

Las películas de resinas metalocénicas pueden tener una morfología diferente porque tienen una arquitectura molecular más uniforme. Este hecho lleva a retardar la migración de los aditivos a la superficie. La clave está, por lo tanto, en lograr que los aditivos lleguen a la superficie de una manera más fácil.

Cuando el mLLDPE se usa como un componente menor en la mezcla, por ejemplo, de 30 a 40% para mejorar las propiedades físicas de LDPE en estructuras de una capa, el concentrado para LDPE convencional trabaja bien. Sin embargo, la tendencia en Estados Unidos es hacia el uso de capas con 100% de mLLDPE en las estructuras de las películas. Los concentrados con resinas metalocénicas se recomienda emplearlos en películas multicapas, donde el mLLDPE o un plastómero conforman la capa de sellado térmico, teniendo como ejemplos las películas para empacar vegetales frescos y carnes, que requieren brillo y transparencia muy altos y baja formación de neblina.

También se han empleado algunos de los nuevos aditivos concentrados con vehículos de mLLDPE y con altos niveles de carga de los elementos activos.

Es importante señalar que los niveles de adición de agentes como lo son los aditivos antibloqueo deben elevarse para balancear el efecto de la baja densidad de los materiales y la pegajosidad de las películas, recomendándose así el uso de un agente de antibloqueo de alta transparencia, con mLLDPE como vehículo, para hacer capas de sellado térmico con 100% de mLLDPE. Cuando no es necesario proveer una alta transparencia y el mLLDPE se usa en una mezcla, los agentes de antibloqueo estándar son suficientes.

Aditivos disponibles

Actualmente hay compañías que ofrecen concentrados de aditivos formulados a la medida del mLLDPE. Entre estos se incluyen los concentrados deslizantes con base en

erucamida o amidas ácidas oléicas; los concentrados de antibloqueo hechos con base en sílicas sintéticas o naturales (como los talcos o las tierras diatomáceas); concentrados antineblina fabricados con ésteres de ácidos grasos; y antiestáticos que contienen cadenas largas de aminas y cortas de amidas.

Incluyendo ayudas de proceso, como el concentrado con 3% de fluoropolímero; el antioxidante y ayuda de proceso con 13% de fenol, 6% de fosfito y fluoropolímero; teniendo también un concentrado protector a la luz ultravioleta con 12% de HALS. Por ejemplo existen líneas de color blanco concentrado a 50, 70 y 80% de TiO_2 y otro producto con 50% de negro de humo con vehículos mLLDPE.

En los dos últimos años, se han lanzado al mercado concentrados con cargas altas de agentes activos deslizantes, antiestáticos y antineblina, en vehículos de mLLDPE, que contienen agentes activos en el rango de 20 a 25%, comparado con los niveles del 3 al 5% de los concentrados convencionales.^[8]

1.8.3 ENFRIAMIENTO EN EL INTERIOR DE LA BURBUJA

El tipo de enfriamiento es un parámetro muy importante ya que afecta en la productividad de la línea, dependiendo de la geometría del anillo, la fuente del aire para el enfriamiento, la temperatura y el enfriamiento interno que puedan tener algunas líneas.

Típicamente, el enfriar el interior de la burbuja mediante un sistema IBC (interior bubble cooling), que mejora la velocidad de producción en un 25 hasta un 50% debido al enfriamiento adicional que puede ser aplicado sin afectar la estabilidad de la burbuja, ya que este es solo un recirculación del mismo aire contenido dentro de la burbuja.



Figura 30. Imagen del enfriamiento dentro de la burbuja.

1.8.4 VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN

Se denomina velocidad de extrusión a la velocidad en revoluciones por minuto con la que se está procesando un material. Este parámetro es fácil de ajustar desde el panel de control, variando la velocidad del motor según la necesidad de la línea.

La velocidad de extrusión será baja durante todos los movimientos de montaje de la línea y durante el ajuste del ancho de la película, para evitar la generación de grandes cantidades de desperdicio de arranque de línea.

Una vez ajustado el ancho de la película por medio del diámetro de la burbuja, será posible incrementar la velocidad de extrusión al máximo, controlando el espesor con la velocidad de tiro del rodillo.

1.8.5 VELOCIDAD DE TIRO

La mejor forma de determinar el espesor de la película es ajustando la velocidad de giro de los rodillos de tiro. Ya que a pesar de que se encuentran en la parte superior de la burbuja donde el plástico se encuentra completamente solidificado, la fuerza con la que se jala la burbuja influye en la zona donde el plástico se encuentra saliendo del dado y aun es moldeable.

Relación de Soplado

Se define como la relación entre los diámetros de la burbuja y el dado que condiciona el estirado de aquella en sentido perpendicular a la extrusión. Obteniendo su valor con el siguiente cálculo matemático:

$$R_s = \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{\pi\theta_2}{\pi\theta_1} = \frac{2L}{\pi\theta_1} \quad ; \quad R_s = 0.64 \frac{2L}{\theta_1}$$

Donde: Rs. Relación de soplado
 θ_1 . Diámetro del dado
 θ_2 . Diámetro de la burbuja
 L. ancho de la película

Las dimensiones del dado y el núcleo deben ser una función de las dimensiones de la película tubular que se desee fabricar, pero al mismo tiempo sus valores deben ser tales que nos proporcionen propiedades ópticas y mecánicas adecuadas. En general, es recomendable trabajar con relaciones de soplado comprendidas entre 1.8 y 2.5.

Si la relación de soplado es muy baja, se obtiene una película con malas propiedades mecánicas al estar muy orientadas en la dirección de la extrusión, apareciendo así mismo ciertas dificultades de enfriamiento que se manifiestan en el bloqueo de las películas. Por el contrario si la relación de soplado es muy elevada, entonces debe de utilizarse menor diámetro del dado y reducir la velocidad de extrusión lo cual conduce a una cierta inestabilidad de la burbuja.

Relación de Tiraje

Se define como la relación que existe entre la velocidad de tiraje y la velocidad de extrusión del material, cuyo valor podemos llegar a obtener mediante el siguiente cálculo:

$$T = \frac{V_2}{V_1}$$

Según la ecuación de conservación de la masa tenemos:

$$V_2 S_2 \rho_2 = V_1 S_1 \rho_1$$

$$T = \frac{V_2}{V_1} = \frac{S_2}{S_1} \times \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Siendo S_1 y S_2 las secciones del dado y de la película tubular respectivamente, las cuales son a su vez función de sus respectivos diámetros.

$$S_1 = \theta_1 h \quad \text{y} \quad S_2 = \theta_2 h$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{\rho_2}{\rho_1} \times \frac{\theta_2}{\theta_1} \times \frac{h}{e}$$

tomando en cuenta lo anterior:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{\theta_2}{\theta_1}$$

y considerando que las relaciones de las densidades del PE en estado fundido (ρ_1) y en estado sólido (ρ_2) es de aproximadamente 0.82 la última expresión nos quedaría de la siguiente manera:

$$T \sim 0.82 \frac{1}{R_s} \times \frac{h}{e}$$

$$T R_s \sim 0.82 (h/e)$$

Donde:

T. relación de tiraje

V_1 . velocidad de extrusión

V_2 . velocidad de tiraje

ρ_1 . densidad de PE fundido

ρ_2 . densidad de PE a temperatura ambiente

S_1 . sección del dado

S_2 . sección de la burbuja

h. paso del dado

e. espesor de la burbuja

Para obtener una buena calidad del PE extruido, es necesario trabajar con relaciones de tiraje cuyos valores estén comprendidos entre 3 y 6.

Si la relación de tiraje es muy pequeña se limita la producción y las propiedades mecánicas no son aceptables, por el contrario si la relación de tiraje es muy elevada, entonces es necesario extruir a una menor relación de soplado y en consecuencia la película tendrá una mala resistencia a la rotura en el sentido de la extrusión.

Regularidad Dimensional

DEFECTOS	SOLUCIONES
PESO POR UNIDAD BAJO	aumentar la velocidad de rotación del husillo o disminuir la velocidad de tiraje
PESO POR UNIDAD ELEVADO	disminuir la velocidad de rotación del husillo o aumentar la velocidad de tiraje
ANCHURA INSUFICIENTE	aumentar el volumen de la burbuja introduciendo aire
ANCHURA MUY GRANDE	disminuir el volumen de la burbuja agujerándola
ESPESORES FINOS	aumentar la velocidad del tiraje y/o disminuir la velocidad del husillo
PARA GRANDES ESPESORES	disminuir la velocidad de tiraje y/o aumentar la velocidad del husillo
ESPESOR IRREGULAR DE UNA MISMA SECCIÓN	línea de enfriamiento irregular ocasionada por una mala reparación del material a la salida del dado. En consecuencia disminuir el paso y centrar el dado hasta conseguir una repartición mas homogénea del material.
	revisar la zona de calefacción del dado, así como el volumen del aire del anillo de enfriamiento

Tabla 3. Defectos y Soluciones en extrusión soplo con condiciones de proceso.

1.8.6 TEMPERATURA DE ENFRIAMIENTO

La calidad óptica del producto esta seriamente ligada a la temperatura y velocidad del aire de enfriamiento, ya que a menor temperatura del aire de enfriamiento, menor será la cristalización u orden que puedan tener las moléculas, conservando así un gran porcentaje de material amorfo y por lo tanto transparencia.

Durante la producción de película soplada, es muy importante controlar y mantener la uniformidad en el espesor de la película y algunas otras propiedades.

Algunas causas que podrían originar la falta de uniformidad en las propiedades de la película puede ser un enfriamiento no homogéneo durante su producción, así como la variación del flujo de aire a través de la burbuja, una temperatura de fundido no homogénea a la salida del dado y un material mezclado durante el proceso de extrusión o combinaciones de algunas.^[7]

Karande, Chum y Huang estudiaron el gradiente de temperatura del polímero fundido antes de salir del dado con un termopar de profundidad variable y lo correlacionaron con la temperatura de la superficie de la burbuja y su variación en calibre y orientación, encontrando que una reducción en el gradiente de temperatura del polímero fundido se lograba una uniformidad del fundido a la salida del dado, y por lo tanto una uniformidad en el calibre y en propiedades mecánicas de las películas.^[9]

En la literatura se reportan valores típicos de perfiles de temperatura:

	Zona 1 del Barril	Zona 2 del Barril	Zona 3 del Barril	Zona 4 del Barril	T
perfil 1	204/207	232/233	232/233	204/207	34
perfil 2	204/206	232/233	204/207	177/179	49
perfil 3	191/194	218/220	227/230	241/245	10
perfil 4	191/193	218/219	227/229	241/245	14

Tabla 4. Perfil de temperaturas pre-fijadas y reales del extrusor.

1.8.7 APLICACIONES

Los productos obtenidos mediante el proceso de extrusión soplado tienen altos valores agregados y con usos especiales, estos pueden producirse ya sea a bajos o altos volúmenes, por lo que tienen un gran mercado consolidado.^[6]

Los productos en presentación de película que podemos encontrar en el mercado son por ejemplo:

- Película “Strech”
- Película termoencogible
- Bolsas
- Empaque en general
- Costal de basura
- Costal de uso pesado
- Publicidad política

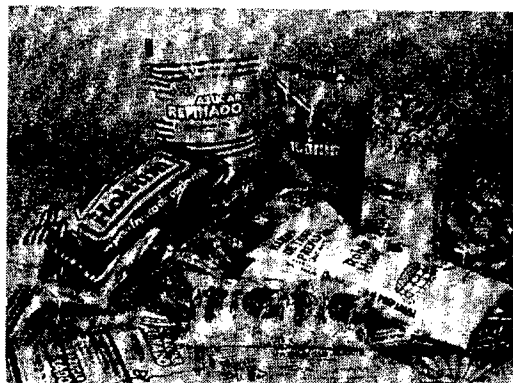


Figura 31. Imagen de los productos fabricados a partir del proceso de extrusión sopló.

1.9 EXTRUSIÓN DE PELÍCULAS Y LÁMINAS

El Polietileno de Baja Densidad (LDPE), tanto convencional como lineal (LLDPE), es el material apropiado para la elaboración de películas y láminas para aplicaciones domésticas para tener contacto con alimentos, debido a su atoxicidad, excelente procesabilidad, elevada tenacidad, flexibilidad y resistencia química, y por tener propiedades de barrera ante la humedad. El polietileno de Alta Densidad (HDPE) grado película, ofrece un excelente balance de propiedades mecánicas y de procesabilidad que lo coloca entre los mejores productos disponibles en el mercado.

Entre los usos finales y aplicaciones de los polietilenos se encuentran: sacos industriales, película termoencogible, rollos para empaque automático, bolsas para hielo, empaques para productos alimenticios, fundas para embalaje, película estirable (stretch film), películas para pañales y bolsas de empaque en general.

A fin de suministrar al mercado la combinación adecuada de procesabilidad y propiedades mecánicas, se pueden producir mezclas de polietilenos, diseñadas para satisfacer los requerimientos del exigente y competitivo mercado actual, particularmente en lo relacionado con la obtención de empaques de menor espesor capaces de mantener el desempeño del producto final.

Otra aplicación importante ocurre en la laminación con papel, aluminio, tela y cartón, entre otros, donde el polietileno cumple funciones como adhesivo, barrera ante la humedad, capa sellante, superficie para impresión o barrera ante el desgarre.

Dentro de la línea de polietilenos lineales de baja densidad (LLDPE) con copolímeros de Buteno y Octeno permiten la manufactura de productos con excelentes balances de costo y desempeño.^[10]

1.10 DEFECTOS RELATIVOS AL ASPECTO DE LA PELÍCULA

DEFECTOS	CAUSAS	SOLUCIONES
INFUNDIDOS	material contaminado	limpieza de silos y tolva
	mezcla de grados diferentes	
	polvo de otros grados en la tolva	
	temperatura baja	aumentar las temperaturas
		disminuir la velocidad de extrusión
	filtraje defectuoso	aumentar el número y disminuir el tamaño del tamiz
	tamaño de la malla	cambiar el tamiz
plastificación insuficiente del material	perfil de temperatura inadecuado	

DEFECTOS	CAUSAS	SOLUCIONES
INFUNDIDOS	plastificación insuficiente del material	aumentar la compresión aumentando los filtros y bajando la temperatura del cabezal
RAYAS	dado sucio	limpiar el dado
	impurezas por estancamiento del material	limpiar cabezal
	tamiz roto	cambiar los tamices
	purga insuficiente de la extrusora al cambiar de grado	purgar bien
	mezcla de grados	eliminar contaminación
	temperatura baja a la altura del plato rompedor	aumentar la temperatura del cabezal y de la zona del plato rompedor
	rozamiento de las guías sobre la burbuja aun demasiado caliente	aflojar las guías
		bajar la línea de enfriamiento y aumentar la refrigeración
disminuir la temperatura de la burbuja disminuyendo la velocidad de extrusión		
	dado defectuoso	cambiarla o mecanizarlo
ASPECTO DE PIEL DE NARANJA	temperatura de extrusión demasiado baja	aumentar la temperatura
	Pirómetro defectuoso	comprobar los pirómetros
	abrazadera rota	Corregirla

DEFECTOS	CAUSAS	SOLUCIONES
ASPECTO DE PIEL DE NARANJA	velocidad demasiada grande para el perfil de temperatura	disminuir la velocidad de extrusión o aumentar la temperatura
	presencia de humedad	secar el material
IRREGULARIDADES DE LA PELÍCULA	distancia de las zonas de estrangulamiento del núcleo a los labios del dado, muy corta o inexistente	poner las zonas correspondientes o aumentar su distancia
	ultima zona del dado demasiado corta	aumentar su longitud
	poca uniformidad del material dentro del cabezal	montar una zona de compresión, aumentando así la homogeneidad del mismo
		suprimir o limitar el flujo principal
	producción excesiva	Reducirla
	Plastificación insuficiente del material	rectificar el perfil de temperatura

DEFECTOS	CAUSAS	SOLUCIONES
PUNTOS NEGROS	materjal contaminado	limpieza de la tolva
	polo en la tolva	
	oxidación del material después de parar la extrusora	purgar y limpiar la maquina
	puntos muertos en las corrientes de flujo	limpiar la maquina y eliminar estas zonas
MEZCLADO IRREGULAR DE PIGMENTOS Y COLORANTES	grado del masterbatch diferente al PE utilizado	cambiar el masterbatch
	homogenización defectuosa del material	disminuir el tamaño de filtros
		utilizar un husillo de mayor capacidad de plastificación
		aumentar perfil de temperaturas
dispersión defectuosa del masterbatch en la mezcla	mejorar la dispersión de la mezcla	
GRAN CANTIDAD DE INFUNDIDOS	aditivos incompatibles con el PE	utilizar aditivos compatibles a este
	masterbatch de distinto grado	cambiar el grado del mismo

Tabla 5. Defectos, Causas y posibles Soluciones para el Proceso de Extrusión Soplo de película tubular.

1.11 DEFECTOS DEBIDO A LAS VARIACIONES DIMENSIONALES

DEFECTOS	CAUSAS	SOLUCIONES
VARIACIONES EN LA LONGITUD DE LA BURBUJA	altura del tiraje muy elevada	mejorar la dirección de la burbuja
		rectificar si es posible la altura de tiraje o bien situar a una altura más baja un par de rodillos pensadores
	altura de la línea de enfriamiento muy elevada	aumentar la cantidad de aire en el anillo de enfriamiento o disminuir la velocidad de la extrusor y/o la temperatura del material
	guías correctoras de la burbuja muy apretadas	Aflojarlas
	líneas de enfriamiento de altura variable	uniformar la irregularidad de aporte del aire en el anillo de enfriamiento
		corregir la temperatura del aire de enfriamiento
	producción del husillo en oleadas	corregir la temperatura del dado
ARRUGAS EN LA BOBINA	tensión elevada	Disminuirla
	tensión muy débil	Aumentar
	mala alimentación de los rodillos de enrollado	corregir alineamiento
	rodillo de eliminación de arrugas poco efectivo	Corregirlo
	arrugas en el tubo	Evitarlas
DESPLAZAMIENTO DE LA BOBINA POR DESLIZAMIENTO	espesor variable	corregir espesores
	mal alineamiento de los cilindros de enrollado	alinearlos bien
FACILIDAD DE ROTURA POR LOS PLIEGUES, ESPECIALMENTE CON MATERIALES DE GRADO ELEVADO	debido al material	aumentar la relación de soplado hasta un mínimo de 2.5

DEFECTOS	CAUSAS	SOLUCIONES
APARICIÓN DE LÍNEAS DE SODADURA, POR LO GENERAL EN LOS CASOS DE ALIMENTACIÓN LATERAL	temperatura muy baja	aumentar el perfil de temperatura
	mala distribución del material	aumentar la temperatura del dado
	recorrido y homogenización insuficiente dentro del cabezal	aumentar el recorrido y el núcleo de las zonas de compresión dentro del mismo
	falta de limpieza	limpiar bien la maquina
INESTABILIDAD DE LA BURBUJA	espesor variable	centrar bien el dado
	línea de enfriamiento muy baja	Subirla
	línea de enfriamiento muy alta	Bajarla
ROTURA DE LA BURBUJA	elevado número de infundidos	
	pegado de la burbuja a la parte baja del cuello del anillo de enfriamiento	aumentar la altura de la línea de enfriamiento aumentar el diámetro del anillo
	paso del dado muy ancho (relación de tirado muy elevado)	utilizar un menor paso del dado
ARRUGAS EN LA BURBUJA	espesor irregular	corregir espesor
	altura irregular	regular altura
	línea de enfriamiento muy alta	disminuir altura
	rodillos mal arreglados o sucios	corregirlos o limpiarlos
	temperatura de la burbuja relativamente baja	disminuir refrigeración de la burbuja o aumentar la velocidad de la extrusora y/o la temperatura del material
BLOQUEO INTERNO	la burbuja llega muy caliente a los rodillos de tiraje	aumentar la refrigeración del anillo de enfriamiento y disminuir la velocidad de la extrusora
BLOQUEO EXTERNO	electricidad, estática producida por frotamiento y/o condiciones de tratado extremas	eliminar electricidad estática antes de enrollado
		disminuir la intensidad del tratamiento

Tabla 6. Defectos, Causas y posibles Soluciones debido a las Variaciones Dimensionales producidas en un proceso de Extrusión Soplo de película tubular.

1.12 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE EXTRUSIÓN EN LAS PROPIEDADES DE LA PELÍCULA TUBULAR

Tanto las propiedades mecánicas como ópticas de una película extruida, se pueden ver influenciadas por las características del PE utilizado y por las condiciones de transformación aplicadas.^[7]

AL AUMENTAR	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA PELÍCULA	PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA PELÍCULA
TEMPERATURA DE EXTRUSIÓN	Aumenta	Aumenta
RELACIÓN D SOPLADO	Aumenta	Mejora hasta un cierto valor
ALTURA DE LA LÍNEA DE ENFRIAMIENTO	Disminuye	Aumenta
PASO DEL DADO	Disminuye	---
PRODUCCIÓN DE LA EXTRUSORA	---	Disminuye

Tabla 7. Influencia de las condiciones de extrusión en las propiedades de la película obtenida por el proceso de extrusión soplo.

CAPITULO II. POLIETILENO

Es el polímero más simple que se conoce, formado por la unión de moléculas de etileno y que esta constituido por carbón e hidrogeno, la fabricación de polímeros consume el 60% del etileno que se produce. El polietileno es el polímero más consumido comercialmente y más popular. Existen, básicamente, dos tipos de polietileno, el polietileno de baja densidad (Low Density PolyEthylene LDPE) y el polietileno de alta densidad (High Density PolyEthylene HDPE). También se pueden distinguir el polietileno lineal de baja densidad y el polietileno de peso molecular ultra-alto (Ultra High Molecular Weight PolyEthylene UHMWPE).^[11]

Los polietilenos son materiales nobles, reciclables y no contaminantes, su combustión controlada no origina gases perjudiciales para la atmósfera. Los productos fabricados con estos materiales, manipulados adecuadamente, son aptos para uso alimentario.

Su fácil procesabilidad, bajo costo, excelente balance de propiedades físicas, y baja densidad, son la razón para que se utilice en numerosas aplicaciones, hasta el punto que, nos sería imposible prescindir en nuestra vida diaria de todos los productos fabricados con estos materiales.

Su impermeabilidad, transparencia y principalmente su gran resistencia en comparación con el poco volumen que ocupan, hacen que los envases y embalajes fabricados con estos materiales sean buenos aliados con el medio ambiente, ya que uno de los mayores problemas que nos encontramos en la sociedad es la gran cantidad y volumen de residuos que se generan.^[12]

es totalmente transparente, disminuyendo esta característica en función del grosor y del grado.



Figura 34. Fotografía de una película de polietileno de baja densidad.

LDPE	
SEGMENTACIÓN DEL MERCADO EN MÉXICO (2001)	
SECTOR	% DEL VOL. TOTAL
Tubería	84
Hogar	6
Películas	1
Otros	9

Tabla 8. Forceja de la resina de LDPE empleada en varios sectores del mercado Mexicano 2001.

El polietileno de alta densidad. es un polímero de cadena lineal no ramificada.

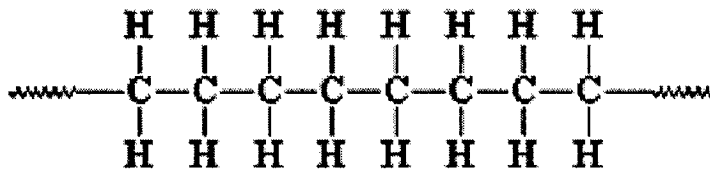


Figura 35. Molécula del Polietileno de Alta Densidad.

El polietileno de Alta Densidad (Baja Presión), difiere del anterior en que se obtiene a bajas presiones y a temperatura más baja, en presencia de un catalizador órgano-metálico. Posee en sus características, más dureza y rigidez, mostrando una densidad mayor 0.94. En estado natural, el film, si bien es translúcido, no es totalmente transparente, tomando un aspecto céreo, igualmente que el anterior, su aspecto irá variando según el grado y el grosor.^[13]



Figura 35. Fotografía de una película de polietileno de alta densidad.

HDPE		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
DENSIDAD	0.941-0.965	g/cm ³
ELONGACIÓN	15-100	%
CALOR ESPECIFICO	0.55	Cal/°C-g
RESISTENCIA AL IMPACTO	1.5-20	pie-lb/pulg
ÍNDICE DE FUNDIDO	0.1-4	g/10min
PESO MOLECULAR PROMEDIO	125,000	
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	3100-5500	Psi
RESISTENCIA DIELECTRICA	> 600	KV/cm

Tabla 9. Propiedades de la Resina de HDE.

HDPE	
SEGMENTACIÓN DEL MERCADO EN MEXICO (2001)	
SECTOR	% DEL VOL. TOTAL
Tubería	43
Industrial	22
Farmacéutico	9
Envases	7
Especialidades	6
Hogar	5
juguetes	2
Otros	6

Tabla 10. Porcentaje de las resinas de LDPE empleadas en varios sectores del mercado Mexicano 2001.

El polietileno lineal de baja densidad. co-polímero que tiene moléculas con pocas ramificaciones y estas son muy cortas (prácticamente no contiene ramificaciones). La estructura con menor grado de ramificación permite la formación de cristales más compactos, modificando las propiedades de este polietileno y también su comportamiento reológico. Esta estructura conforma un material que presenta un cuadro de cualidades intermedias entre el polietileno de baja densidad y el de alta densidad.

La menor ramificación del LLDPE permite un mayor acomodo de las estructuras cristalinas, esto le confiere una mayor densidad del material en comparación con el LDPE convencional. La apariencia de este material es translúcida debido a la presencia de los cristales que forman su estructura; el valor de nebulosidad (*haze*) puede variar de 1 a 18%. Este material es menos transparente que el de baja densidad.

El LLDPE muestra una alta permeabilidad a los gases. El paso del vapor del agua y de la humedad a través de su estructura es muy bajo. Paralelamente, la absorción de agua es muy baja, ya que alcanza un valor de 0.01% en un periodo de 24 hrs.

LLDPE		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
RESISTENCIA A LA TENSIÓN	10.3 - 22.1	Mpa
RESISTENCIA A LA RUPTURA	13.1 - 26.7	Mpa
CONSTANTE DIELECTRICA	24	50 - 160 Hertz
T _M	122 - 124	°C
TVICAT / MÉTODO B	115	°C

Tabla 11. Propiedades de las Resinas de LLDPE.

SEGMENTACIÓN DEL MERCADO DEL LLDPE EN MÉXICO (1996)	
SECTOR	% DEL VOL. TOTAL
Envase	71.7
Agrícola	12.5
Consumo	8.3
Construcción	3.3
Médico	2.5
Eléctrico	1.7

Tabla 12. Porcentaje de las resinas de LLDPE empleadas en varios sectores del mercado Mexicano 1996.

Sector Envase	
Producto	Participación en %
Botellas	42.5
Películas	21.5
Cajas	16.1
Cubetas	8.1
Raffia	5.4
Tapas	2.2
Varios	1.6

Tabla 13. Porcentaje de las resinas de LLDPE empleadas en el sector de envase.

LDPE vs. HDPE

PROPIEDADES	LDPE	HDPE	UNIDADES
PESO	0.92	0.94	gr/cm ² film de 0.025
CARGA DE ROTURA	23	23.5	cm ³ /gr
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	100-170	210-380	Kg/cm ²
DUREZA	500-725	100-200	%
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	40-45	60-70	(SHORE)
CALOR ESPECÍFICO	8	0.55	cal/s cm. °C
TEMP. REBLANDECIMIENTO	80-90	90-120	(VICAT) °C
TEMP. DE FUSIÓN	110-115	130-140	°C
TEMP. DE TRABAJO (EXTRUSIÓN)	150-160	170-220	°C

Tabla 14. Tabla de propiedades de los polietilenos de LDPE y HDPE.

2.1 PELÍCULA DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

El polietileno es un polímero semicristalino y el grado de cristalinidad se manifiesta en su densidad y en su temperatura de fusión.

Las variedades de baja densidad contienen cadenas muy ramificadas y su densidad es de 0.91 a 0.925 g/cc. Variaciones de baja densidad afectan a las propiedades del material: como la rigidez, resistencia tensil y las propiedades de barrera mejoran al aumentar la densidad, mientras que la resistencia al impacto y al desgarre decrecen.

El peso molecular es otra propiedad importante y esta relacionado directamente con el índice de fluidez, las resinas para películas tienen un índice de fluidez de 0.2 a 7.0 g/10 min. Para pesos moleculares mayores generalmente aumentan las propiedades mecánicas y de barrera, pero disminuye la transparencia de la película.

La película de polietileno se produce por extrusión-soplo a través de boquillas circulares o por extrusión de boquillas planas y por enfriamiento rápido en rodillos (película plana).

El proceso de extrusión-soplo es más versátil y proporciona una mejor orientación, esta a su vez proporciona mejores propiedades mecánicas a las películas. El proceso de película plana se usa cuando se desea mejor transparencia, el enfriamiento rápido reduce la cristalinidad del polímero logrando así una mejor transparencia. Sin embargo, la orientación unidimensional produce películas de baja resistencia en la dirección transversal.

Las películas de polietileno de baja densidad tienen espesores que van de 0.00035 a 0.010 pulgadas y son vendidas en forma de hojas o de rollos.

En la siguiente tabla se indican algunas propiedades y aplicaciones típicas de este material:

APLICACIÓN		DENSIDAD g/cc	INDICE DE FLUIDEZ g/10 MIN
1	PAN	0.924	1.5-2.5
2	BOLSA PARA BASURA	0.919	1.0-2.0
3	BOLSA PARA MERCANCÍA	0.919	0.2-0.4
4	ENVOLTURA DE CONTACTO	0.922	0.2-0.4
5	BOLSA PARA ROPA	0.923	5.0-7.0
6	BOLSA PARA HIELO	0.926	0.3-1.0
7	PELÍCULA RETRÁCTIL	0.935	0.4-1.0

Tabla 15. Tabla de las aplicaciones del LDPE obtenidas mediante el proceso de Extrusión Soplo.

El polietileno de baja densidad, debido a su bajo precio y su versatilidad, sigue siendo el material mas importante para empackado de alimentos ya sea solo o en muchas películas co-extruidas y laminaciones.^[14]

Propiedades comparativas entre los diferentes grados de PE

POLIETILENO	CRISTALINIDAD	DENSIDAD	T FUSION
	%	g/cc	°C
ALTA DENSIDAD	80-95	0.94-0.97	135
BAJA DENSIDAD	50-75	0.91-0.93	105-110
LINEAL DE BAJA	70-90	0.92-0.95	110-125

Tabla 16. Propiedades comparativas de los diferentes grados de polietileno.

CAPITULO III. MEZCLAS

Las mezclas de materiales poliméricos fueron implementadas a partir de la idea de combinar dos materiales diferentes, que por si mismos tienen buen desempeño, con el objeto de obtener un material con propiedades intermedias entre las de los polímeros por separado. Los materiales constituidos por dos polímeros que se combinan se denominan mezclas. Obteniendo así dos tipos de mezclas: miscibles e inmiscibles.

3.1 MEZCLAS MISCIBLES

Aunque parezca sencillo, la mezcla de dos clases diferentes de polímeros puede ser un tema realmente delicado. Es decir, difícil que dos clases diferentes de polímeros se mezclen adecuadamente. Teniendo en cuenta que se necesita saber el valor de la entropía para poder saber si es factible la mezcla, recordando la segunda ley de la termodinámica, donde dice que cuando las cosas cambian, lo hacen de un estado ordenado a otro desordenado. Lograr que las cosas cambien en un sentido ordenado es muy difícil, esto es, si ocurre de un estado de menor entropía a otro de mayor entropía, esto presenta un problema tratando de generar mezclas poliméricas.

Una de las mayores razones por las cuales dos compuestos existen mezclados, es que se encuentran más desordenados como mezclas que cuando están separados. Pero un polímero amorfo por su naturaleza ya se encuentra tan desordenado, no ganará mucha entropía cuando sea mezclado con otro polímero. Por lo tanto la mezcla resulta desfavorecida.

La primera ley de la termodinámica dice que cuando las cosas cambian, lo hacen de un estado de mayor energía a otro de menor energía. Para lograr que dos polímeros se

mezclen, debemos hacer que éstos tengan menos energía cuando están mezclados que cuando están separados.

3.1.2 REALIZACIÓN DE LAS MEZCLAS

Existen diferentes métodos para realizar la compatibilización. La funcionalización de los componentes de la mezcla antes de dicho mezclado, o la adición de un copolímero durante el mezclado promoviendo, en muchos casos, la compatibilización en sistemas multifásicos.

En investigaciones recientes se está utilizando otra técnica de compatibilización que consiste en la formación IN-SITU de copolímeros interfaciales durante el mezclado en fundido.

Las mezclas de polietileno (PE) con poliamida 6 (PA) son ejemplos de polímeros que poseen una combinación sinérgica de las propiedades típicas del PE, concretamente bajo costo, procesabilidad, elasticidad y resistencia a la humedad; con las del Nylon 6 rigidez, estabilidad térmica y sus propiedades de barrera al oxígeno y solventes, esto sucede cuando las mezclas son compatibilizadas apropiadamente.

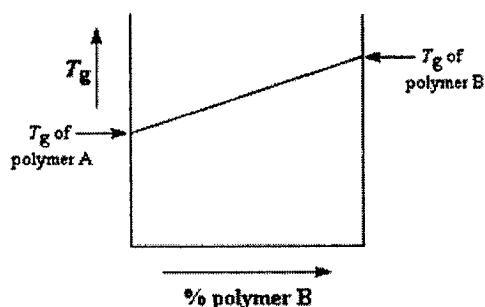
Algunos estudios de compatibilización de mezclas de poliamida / polietileno se realizaron a través de un injerto de anhídrido maleico en la fase de polietileno fueron reportados.

Los compatibilizantes para este tipo de mezclas consisten en poliolefinas que contienen grupos funcionales como anhídrido maléico (MAH), entre otros, estos mejoran enormemente las propiedades de las mezclas, aumentando la dispersión de las gotitas de fase menor, dificultando su unión, y mejora la adhesión interfacial.

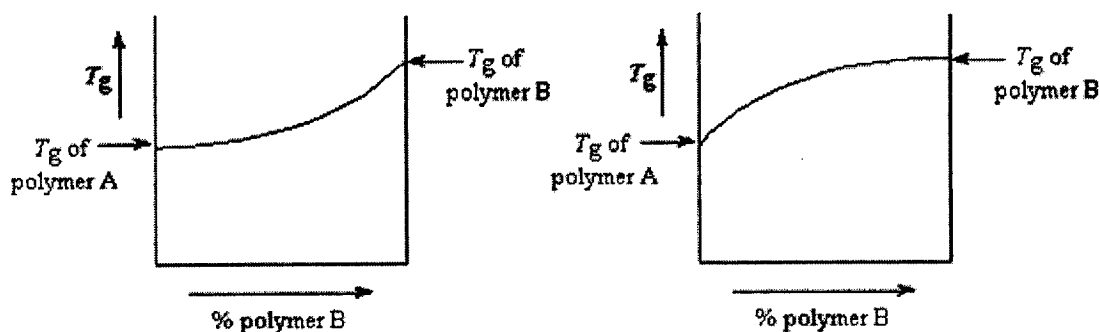
En la morfología y las propiedades de estas mezclas fueron demostradas que están en función de la proporción de la reactividad para polietileno no reactivo, el contenido de anhídrido, y la composición y la viscosidad de la mezcla de componentes.

Propiedades de las Mezclas Miscibles. Si tenemos el polímero A y lo mezclamos con el polímero B, la T_g dependerá de la relación polímero A-polímero B en la mezcla. Veamos el gráfico de abajo.

Entiendo que la Temperatura de Transición Vítrea (T_g), es la temperatura en la cual los materiales amorfos reblandecen, antes de esta tiene un comportamiento parecido a la del vidrio y después de ella muestran un comportamiento visco-elástico.



Si el polímero B tiene una T_g mayor a la del polímero A, la T_g de la mezcla va a aumentar a medida que se incremente la cantidad de polímero B en la mezcla. El incremento es generalmente lineal, como puede observarse en el gráfico. Pero la curva no es perfectamente lineal. A veces, si los dos polímeros se unen más fuertemente entre sí que cada uno por separado, la T_g será mayor a la esperada, ya que las uniones fuertes disminuyen la movilidad de las cadenas. La curva tendrá la forma que usted ve en el gráfico de la derecha.



De hecho, en la mayoría de los casos, los dos polímeros se unen menos fuertemente entre sí que cada uno por separado, por lo tanto las Tg de las mezclas son generalmente un poco menores a las esperadas. La curva de Tg tendrá la forma que usted ve en el gráfico de arriba, a la izquierda.

Ya que las propiedades mecánicas, la resistencia a los agentes químicos, resistencia a la radiación o calor; comúnmente tienen las mismas curvas de Tg con respecto a las cantidades relativas de cada polímero en la mezcla.^[15]

3.2 MEZCLAS INMISCIBLES

Es usual que dos polímeros se combinen entre sí, las mezclas de fases separadas son justamente lo que se obtiene cuando se trata de combinar a la mayoría de los polímeros, ya que los materiales de fases separadas a menudo se transforman en mezclas inmiscibles.

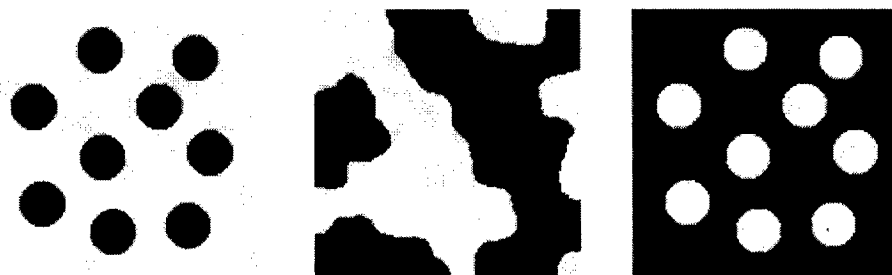


Figura 36. Esquema del mecanismo de una mezcla inmiscible.

Por lo que en la Figura (35), se muestra que en estos materiales no logran mezclarse, obteniendo materiales que realmente mezclas.

La morfología de una mezcla inmiscible, es controlar las cantidades relativas de los dos polímeros que se están empleando.

Propiedades de las Mezclas Inmiscibles. Una propiedad inusual de las mezclas inmiscibles es que presentan en la mayoría de las veces dos temperaturas de transición vítrea (T_g), esto es debido a que los dos componentes se encuentran en fases separadas, conservando así sus T_g separadas. De hecho, los científicos a menudo miden las T_g de una mezcla, para saber si ésta es miscible o inmiscible. Si obtienen dos T_g entonces la mezcla es inmiscible. Si se observa una sola T_g entonces la mezcla es probablemente miscible.

Por lo que se le puede proporcionar de resistencia a una mezcla inmiscible empleando cantidades equivalentes de ambos polímeros. Cuando el polímero A y el polímero B están presentes en cantidades aproximadamente iguales, forman dos fases co-continuas. Esto significa que ambas fases soportarán la carga de cualquier tensión sobre el material y por lo tanto serán más resistentes.

Pero una de las formas más eficientes de hacer que las mezclas inmiscibles sean resistentes, es utilizando un compatibilizante. Estos nos ayudan a unir las dos fases de una manera más compacta. Es decir, en una mezcla inmiscible, las dos fases no están muy fuertemente unidas entre sí.

A menudo, un compatibilizante es un copolímero en bloque de los dos componentes de la mezcla inmiscible. Los copolímeros en bloque mantienen las dos fases unidas y permiten que la energía sea transferida de una fase a la otra. Esto quiere decir que el componente minoritario puede mejorar las propiedades mecánicas del componente mayoritario.^[16]

3.3 MEZCLAS DE POLIETILENOS

Mezclas de LLDPE/LDPE

Los polietilenos ramificados (LDPE) y lineales (LLDPE) de baja densidad suelen utilizarse mezclados en la producción de películas, de manera que se logre combinar las

ventajas inherentes a ambas resinas, tales como las excelentes propiedades mecánicas del LLDPE y la buena procesabilidad del LDPE.

Estas mezclas pueden clasificarse en dos categorías: mezclas ricas en LLDPE y ricas en LDPE. El uso de estas mezclas depende de los niveles de oferta de cada resina, por los tipos de maquinaria, los hábitos de consumo de cada mercado regional. La composición de las mezclas puede variar de un país a otro, por ejemplo el mercado Europeo utiliza mayoritariamente las mezclas ricas en LDPE mientras que en Norte América predomina el uso de las mezclas con mayor cantidad de LLDPE.

A medida que se han desarrollado nuevos polietilenos lineales y se ha modernizado la maquinaria procesadora ha aumentado la tendencia a usar el LLDPE en mayor proporción. Es así como, hace 15 años, se limitaba la incorporación de LLDPE al 30%. En la actualidad, el uso de mezclas en proporciones de LLDPE/LDPE 85/15 o hasta LLDPE puro es cada vez mas frecuente.

El desarrollo evolutivo de los polietilenos lineales ha fortalecido atributos como:

- a. superiores propiedades mecánicas
- b. excelente apariencia (transparencia, brillo, bajo nivel de geles)
- c. excelentes propiedades de sellado
- d. bajos costos de producción y transformación.

Los beneficios aportados por el LLDPE han hecho que en aplicaciones tales como: sacos de alto desempeño, película para acolchado, película para separadores de cauchos, liners industriales, película estirable, bolsas para hielo, bolsas para empaque secundario, y bolsas para basura, predomine el uso de mezclas ricas en polietilenos lineales.

3.3.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades de las mezclas que a continuación se presentan fueron medidas en películas de MFI: 0.80 dg/min, densidad: 0.919 g/cc y con otra de MFI: 0.27 dg/min, densidad: 0.922 g/cc, de 120 micras de espesor.

Evaluando el módulo de elasticidad en tensión con respecto a la composición de la mezcla LLDPE/LDPE. Ya que este módulo de elasticidad en la película es una propiedad clave para las aplicaciones en las cuales se empacarán o embalarán productos pesados (>10 kg.). En la medida que el módulo de elasticidad del material aumenta, el usuario podrá emplear películas de menor espesor sin que el empaque elaborado experimente grandes deformaciones durante sus operaciones de manejo, almacenamiento y transporte.

Se puede observar que, tanto en la dirección de extrusión (MD) como en la transversal (TD), el módulo alcanza su máximo valor cuando la mezcla es rica en LLDPE (80 a 90% de LLDPE). La tendencia representada por el módulo revela la existencia de efectos sinérgicos y antagónicos de las mezclas LLDPE/LDPE que deben ser tomados en cuenta en el diseño de las mismas.

Conceptualmente, se habla de la existencia de interacciones sinérgicas, cuándo el comportamiento de la mezcla es superior al que proporcionalmente se obtendría a partir de las propiedades de los componentes puros (líneas punteadas, Figura (36)). La existencia de interacciones sinérgicas en las mezclas LLDPE/LDPE nos permiten, en este caso, obtener mezclas con 70 a 80% de LLDPE con módulos de elasticidad superiores a los del lineal puro. Similar situación se presenta en la región rica en baja densidad (entre 10 y 30%) con respecto al puro.

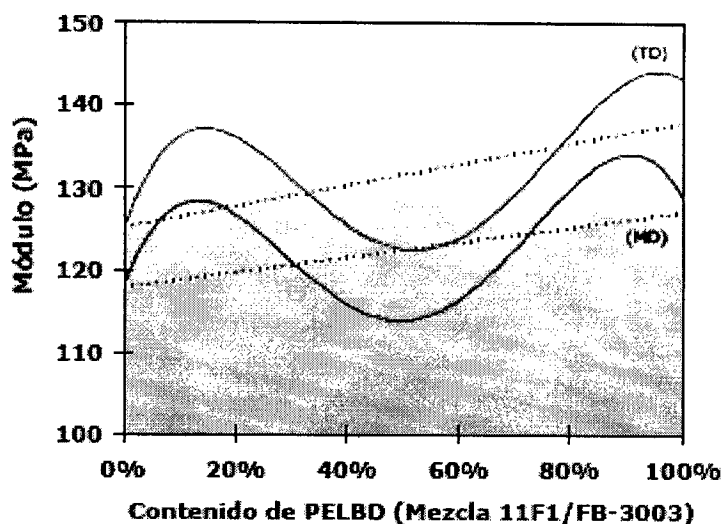


Figura 37. Módulo de elasticidad como función del porcentaje de LLDPE en la mezcla.

Por el contrario, cuándo la composición de la mezcla se encuentra en una región en la que tienen lugar interacciones antagónicas, las propiedades resultantes son inferiores a las que proporcionalmente se obtendrían a partir de los constituyentes puros. La existencia de interacciones antagónicas en la región entre 30 y 70% de LLDPE hace que la mezcla resultante exhiba módulos de elasticidad inferiores incluso a los del LDPE puro; comportamiento que obligará a emplear un mayor espesor en la película para compensar el deterioro de esta propiedad.

Las propiedades de la película en su punto de ruptura muestran variaciones mucho más importantes que las ilustradas para el módulo de elasticidad.

La Figura (37), se ilustra el incremento sobre la tenacidad que aporta la incorporación del LLDPE a las mezclas con LDPE.

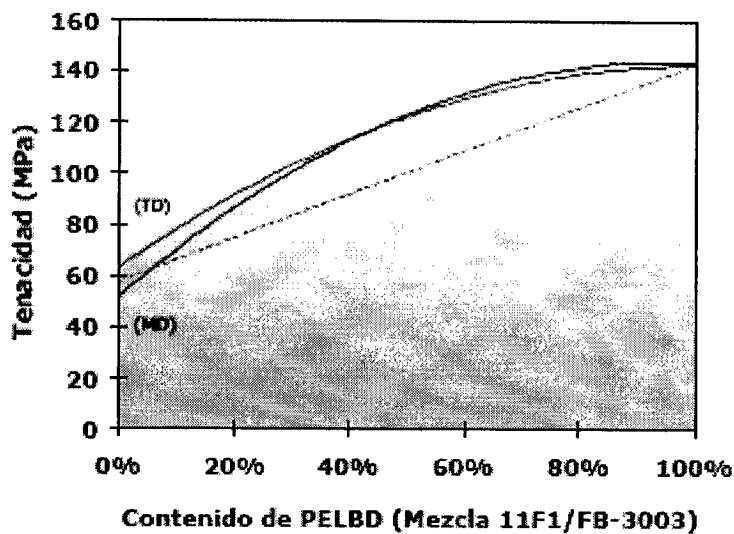


Figura 38. Tenacidad en ruptura como función del porcentaje de LDPE en la mezcla.

La tenacidad es una propiedad compuesta que representa la capacidad del material de absorber la energía mecánica aplicada, transformándola en deformación plástica. Cualquier incremento de la tenacidad se traduce en una mayor facultad de la película de soportar procesos de falla como los de rasgado e impacto.

Se observa la tenacidad y la resistencia al rasgado, es sinérgico en todo el intervalo de composición. (Figura 38)

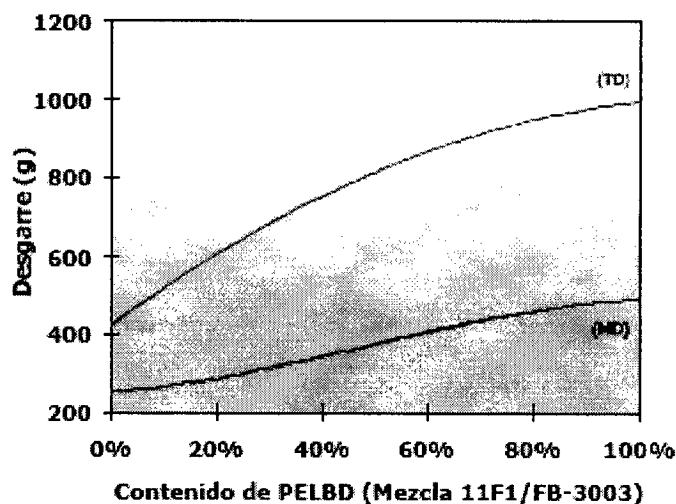


Figura 39. Resistencia al desgarre como función del porcentaje de LLDPE en la mezcla.

El efecto combinado de la mejora de estas propiedades se traduce en la posibilidad de crear películas con menor espesor del que se produciría con mezclas ricas en LDPE, pero manteniendo o incluso mejorando las propiedades mecánicas.

Procesabilidad

Debido a las diferentes propiedades de flujo de los Polietilenos ramificados de baja densidad y los lineales, ambos tipos de resinas deben ser procesados bajo diferentes condiciones de extrusión.

Para obtener el desempeño óptimo de los equipos de transformación, con mezclas con mayor porcentaje de LLDPE, es conveniente seguir las siguientes recomendaciones:

- utilizar mayor temperatura de extrusión y perfiles parabólicos que favorezcan la disminución del consumo de potencia, así como una baja temperatura de salida de la boquilla que controle la tendencia a la inestabilidad de los polietilenos lineales de baja densidad y las mezclas ricas en ellos.
- utilizar boquillas con mayores aberturas de labio (entre 1.2 y 2.5mm) y menor longitud de descarga.
- utilizar tornillos de mayor paso o ángulo de hélice.
- emplear anillos de enfriamiento con doble salida de aire. Figura (39)

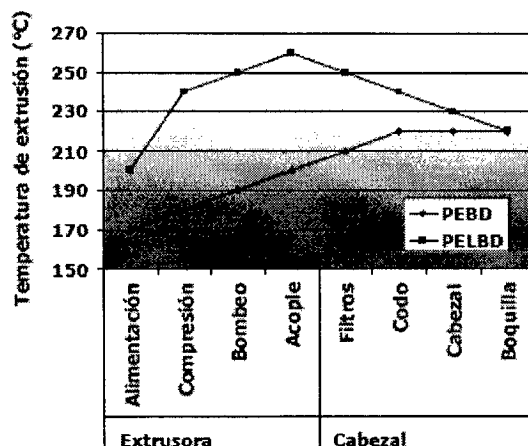


Figura 40. Comparación del perfil de temperatura de extrusión sugerido para mezclas ricas en polietilenos lineales de baja densidad.

Las mezclas ricas en polietilenos lineales de baja, poseen una mayor capacidad de estiramiento en fundido, lo que permite lograr mayores relaciones de estiramiento o adelgazamiento.^[17]

La siguiente tabla muestra las limitaciones que con más frecuencia se presentan:

Restricción	Indicios de la limitación.	Acción correctiva temporal.
Boquilla con abertura inferior a 1,2 mm.	Impide alcanzar el máximo caudal de extrusión por alta presión, presencia de líneas fractura o alto consumo de potencia.	Aumente la temperatura del cabezal y boquilla hasta que se reduzca la presión, la potencia o desaparezca la fractura de fundido.
Anillo de enfriamiento de una salida.	Impide emplear el máximo caudal de aire de enfriamiento debido a que desestabiliza la burbuja	Emplee aire refrigerado para aumentar la capacidad de enfriamiento a un menor caudal.
Tornillo de extrusión de diseño inadecuado.	Alto consumo de potencia, presencia de puntos de material degradado e infundidos.	Aumente la temperatura de extrusión, y suplementar la receta de estabilización de la resina base con concentrados de antioxidante.
Motor de baja potencia.	Excesivo consumo eléctrico y paradas por sobre calentamiento del motor.	Aumente la temperatura de extrusión.

Tabla 17. Limitaciones que presentan componentes y accesorios de un equipo de extrusión.

3.3.2 OTRAS MEZCLAS DE POLIETILENOS

Se han obtenido una gran cantidad de resinas de alto desempeño para la aplicación en películas en los últimos años, esto debido a los avances de los catalizadores de Ziegler-Natta y de los catalizadores de un solo sitio. Estas resinas mejoran significativamente

algunas de las propiedades de las películas obtenidas a partir de las resinas comerciales, pero estas llegan a tener un mayor costo y un comportamiento difícil de procesar.

Por tal motivo se han implementado nuevos manejos para disminuir el costo y mejorar la procesabilidad de las nuevas resinas, esto se puede lograr mediante el mezclado posterior a la salida del reactor.

Estos costos se pueden reducir utilizando buteno-LLDPE con LDPE, mejorando así el procesamiento. Las resinas de alto rendimiento cuando son mezclados presentan un efecto perjudicial sobre las propiedades de fuerza en la película (modulo), aunque estas solo presentadas en ciertas concentraciones.

	CONTROL	BAJA	MEDIA	ALTA
DENSIDAD	0.918	0.921	0.924	0.927
MODULO / 1000 PSI	37.1	42.9	50.9	59.9
% INCREMENTO		16	37	62

La viabilidad de algunas composiciones de las mezclas son reportadas con respecto al costo y la evaluación del desempeño de las propiedades. Por lo que en algunos trabajos se han utilizado el mezclado de LDPE y LLDPE con buteno, obteniendo propiedades mecánicas y ópticas mejores a los mostrados por LLDPE-metalocenos.

Un numero de resinas nuevas han sido introducidas a lo largo de la década pasada para aplicaciones de películas de LLDPE con un alto modulo. Aunque ambas familias de LLDPE (usando otro catalizador de sitio o de Ziegler-Natta), son utilizadas en el proceso de extrusión de resinas con altas presiones con LDPE. Ya que mezclando el LDPE con LLDPE, se mejoran la procesabilidad de las películas. Algunas de estas mezclas pueden ser viables por la combinación de un grado de LLDPE, debido a su capacidad de

mezclado del mismo y los avances reportados con Ziegler-Natta/hexano con las resinas de alto desempeño (HPH)/LLDPE en muestras con LDPE.

Debido a que en el mezclado de LDPE se han propuesto el mejoramiento de la procesabilidad de este, se ha buscado tener una segunda forma de mezclar en la industria de buteno-LLDPE, reduciendo así el costo de obtención (buteno/LLDPE puede ser 10-20% más barato que el hexeno-LLDPE de alto desempeño).^[18]

Encontrando así en estas mezclas que la rigidez que exhiben las películas a partir de este material generalmente representa valores altos del modulo. Ya que con un incrementando en la cantidad de HDPE, incrementa en mayor valor el modulo de 30 a 60 MPsi.

3.4 POLIETILENOS EN PELÍCULA SOPLADA

Muchas de las mejoras en el mezclado, han dado origen a nuevas aplicaciones de película polietileno de alta densidad (HDPE) con polietileno de baja densidad (LDPE), esto con el fin de lograr una mejoría en las propiedades físicas. Por ejemplo la mezcla de HDPE con LDPE promueve una alta rigidez y mantiene la potencia para la retención en películas encogidas.

HDPE/LDPE mezclado también son empleados en envolturas para papel sanitario, ya que el HDPE le confiere rigidez suficiente para esfuerzos mecánicos de alta velocidad, por lo que diferentes tipos de envolturas utilizan esta mezcla para mejorar el desempeño mecánico.

Con la combinación de HDPE/LDPE, las películas de polietileno son envolturas flexibles ya que tienen un alto desempeño y bajo costo; analizando que la clave del desempeño de un producto para aplicaciones de envoltura requiere:

- Características de Procesamiento
 - a) características mecánicas
 - b) propiedades de sellado
 - c) propiedades de encogimiento

- Propiedades Físicas
 - d) ópticas
 - e) rigidez (o flexibilidad)
 - f) barrera (especialmente para envolturas de alimentos)

Las películas de LDPE son utilizadas en diferentes tipos de envolturas debido a su excelente sello, rigidez y propiedades ópticas. Muchas de estas aplicaciones requieren de características mecánicas, propiedades de barrera y rigidez, que el LDPE por si solo no puede proporcionar.^[19]

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

Actualmente, se ha buscado la implementación de novedosas resinas para la fabricación de películas con propiedades mecánicas superiores, por lo que las compañías que se dedican a la síntesis de los materiales plásticos han obtenido nuevas series de productos para este proceso de transformación.

Estas nuevas series de polietilenos son los de mediana densidad (0.93 g/cc) y de alto peso molecular (con un MFI de 0.05), obtenidos con una distribución bimodal de pesos moleculares en multireactores de tecnología de catalizadores en suspensión. Con estos nuevos materiales se obtienen películas más transparentes que la versiones de alta densidad, con un tacto más suave y una mayor resistencia al rasgado

Estas resinas nuevas también pueden ser mezcladas con un LLDPE de hexeno, generando alto desempeño en películas sopladas. Esta última referencia ofrece más facilidad de procesamiento y una mayor resistencia al rasgado que los mLLDPE. Estas películas combinan la facilidad de sellado del LLDPE con la rigidez del MDPE. Por lo que las nuevas investigaciones reportan las propiedades de las nuevas resinas de bajo costo y alto desempeño, que en su mayoría se han obtenido a partir de mezclas de diferentes grados de las resinas de polietileno.^[20]

Por otra parte las inestabilidades en la fabricación de película soplada afectan la calidad de la película así como el control del proceso y generalmente causan una disminución en la productividad.

Ya que en el transcurso del último año los proveedores de tecnología para transformación de película soplada se han enfocado a desarrollar mejoras en el suministro de nuevas alternativas para el control y manejo periférico de películas, siendo que se ha tenido un

mayor progreso en la producción de película soplada para agricultura, esto es con sistemas multicapa que producen película de barrera de alto desempeño y mayor durabilidad. Las mejoras en cabezales están enfocadas a reducir el tiempo de purga y cambio de producto, y los sistemas de control hacen factible incrementar la eficiencia en el cableado y diagnóstico de problemas, así como el acceso remoto a través de internet.



Figura 38. Línea Macro BXL, de Macro Engineering.

Han aparecido nuevos sistemas de las líneas de una máquina de extrusión soplada, un ejemplo de esto es: el sistema BXL-5180 que es una línea de extrusión de cinco capas más avanzada. El corazón del sistema es el cabezal de co-extrusión patentado MacroPack, con flexibilidad para procesar múltiples mezclas y resinas y con capacidad de producir películas con excelente uniformidad de espesor, y con las propiedades ópticas y mecánicas deseadas. En el cual se obtienen nuevas características del dado, enfriamiento (se hace con el anillo de aire de labio doble D10 al interior de la burbuja), el control se llevará a cabo con el sistema Supercom y empleará las bobinadoras centrales periféricas Automax TBF180G, también de Macro, cuyas características bidireccionales, de tensión decreciente y de embobinado con apertura (gap), permiten mejorar la calidad de los rollos.

En el cual se combinan novedosas modificaciones a la maquinaria, de fácil control y manejo de la misma, evitando así errores humanos dentro de la operación.

Brampton Engineering ha desarrollado un sistema llamado AquaFrost, que de acuerdo con la empresa, permite producir película soplada multi-capa en cantidades comparables con el proceso "cast", igualando las propiedades ópticas y la transparencia. El sistema, que permite tener una orientación balanceada, extruye hacia abajo y utiliza agua como medio de enfriamiento.

Por su parte, *Windmüller & Hölscher* avanza con el cabezal *Maxicone* para la elaboración de películas de cinco hasta siete capas, cuyo éxito se basa en un diseño compacto que reduce el tiempo de cambio en la producción de película. De acuerdo con declaraciones de la empresa, uno de sus clientes ha reportado una reducción de 80% en el tiempo de cambios de producto. Este impactante resultado se logra gracias a que el tamaño del cabezal se ha reducido casi a la mitad, comparado con versiones anteriores. El dado, que está equipado con el sistema patentado de distribución cónica, posee el volumen de masa fundida más pequeño de todos los sistemas conocidos en el mercado, de acuerdo con la empresa. Gracias a la flexibilidad del diseño, con el nuevo cabezal es posible además alcanzar altos rendimientos en producción de películas de barrera y compuestos de poliolefina.^[21]

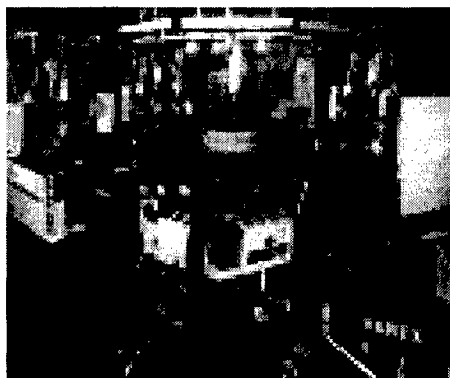


Figura 39. Cabezal de soplado MAXICONE, de Windmüller & Hölscher.

ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Los nuevos equipos para la elaboración de película soplada, se encuentran diseñados para satisfacer las demandas de control de calidad y estabilidad del material extruido. Por lo que las tecnologías tienen en común el propósito de maximizar la capacidad de operación, incrementar la rentabilidad y vincular a los procesos nuevos materiales, inclusive los que son difíciles de procesar.

Muchas de las características estéticas y de desempeño de los productos finales, son de gran interés para lograr un mejor desempeño y cubrir un mayor mercado de alta exigencia, por lo que en los últimos años se ha trabajado película soplada simple y multicapa, ya que por sus propiedades de barrera a gases y aromas, resistencia química, a la tensión, al encogimiento y al punzado; se vuelve un producto atractivo para la industria. Bajo esta premisa, las estructuras de barrera cada vez más complejas determinan la tendencia.

Así mismo, los fabricantes de equipos de extrusión de películas sopladas han enfatizado sus desarrollos en el incremento de la productividad y en un mejor control del espesor de las películas. Este último factor trae beneficios para la calidad de los rollos, que resultan ser más planos y pueden ser procesados a una mayor velocidad en las operaciones posteriores de conversión.

Por lo que las mezclas de la familia de los polietilenos, su rango de operación, así como el crecimiento de la tecnología en los equipos de extrusión soplada, aportan una nueva variedad de productos finales con altas propiedades mecánicas, ópticas, etc. Debido a que estos se pueden utilizar como apoyo en películas multicapas co-extruidas, para aumentar la vida útil del material contenido.

CONCLUSIONES

La demanda del mercado ha provocado una evolución y progreso de los equipos de procesado para fabricar películas plásticas, esto es debido a que la tendencia es el desarrollo de tecnología, buscando una mayor producción y nuevas aplicaciones de mayor valor agregado.

Un aspecto importante es aumentar la capacidad de producción, para lo cual resulta indispensable mejorar la estabilidad de la burbuja, con el implemento de un mejor sistema de enfriamiento. Mostrando una tendencia de nuevos desarrollos en extrusores donde puede mejorarse la homogeneidad de la masa fundida a temperaturas mas bajas y mejores sistemas de enfriamiento como es el uso del anillo doble.

Debido a que se requiere un aumento en la capacidad de producción, actualmente se necesita una flexibilidad de la líneas para obtener diferentes productos y especialidades, donde se necesitan equipos con alta capacidad y capaces de realizar cambios en cortos tiempos para obtener diferentes tipos de productos.

Se han diseñado nuevos dados para obtener mejor flujo y uniformidad del producto terminado a altas velocidades de producción, para extrusión y co-extrusión.

Con respecto al control automático, se ha perfeccionado para apoyar a la industria, no obstante existen industrias con equipos sin automatizar en el sector industrial.

Es importante controlar los espesores y dimensiones de la película, ya que la automatización permite reducir tolerancias en un 50 % o mas. Ya que es importante que las pequeñas variaciones estén distribuidas a lo largo del ancho de la película. En particular para la obtención de una película homogénea para satisfacer las necesidades de los equipos automáticos de empaclado.

Los espesores de la película pueden controlarse con equipo que no tiene contacto directo, lo cual es importante cuando se trata de películas adhesivas.

El mercado de la co-extrusión esta creciendo rápidamente. Se ha duplicado en la ultima década y seguirá creciendo, también existe la tendencia ha aumentar el numero de capas, para obtener una estructura mas precisa y a menor costo, mejorando el tratamiento e impresión de las películas debido a los requerimientos del mercado.

En cuanto a las resinas se han desarrollado materiales con mejores propiedades mecánicas y que permitan obtener películas de menor espesor, buscando una mayor claridad, mejor sellado y mejor impresión.

REFERENCIAS

- [1] Equipo editorial de Tecnología del Plástico, Resinas: Innovación para las Industrias, Noviembre 2001, consulta Agosto 2007.
- [2] Ramos, Extrusión de Plásticos (Principios Básicos), Ed. Limusa CIQA, Pg. 11-14.
- [3] Santiago Oliverio, Propiedades de Flujo y Extrusión de Plástico, CIQA, Páginas 1-III-IV-10.
- [4] Dr. Ramírez Eduardo, MC. Hdz. Juan Sergio, Análisis y Evaluación de Plásticos, CIQA, 2001 Pag. 107-119.
- [5] http://es.wikipedia.org/wiki/Extrusi%C3%B3n_de_pol%C3%ADmero
- [6] Enciclopedia del Plástico, Tomo 3 Capítulo 34
- [7] Depto. De Asistencia Técnica y Desarrollo de SAETA, El Polietileno de Baja Densidad (Técnicas de Transformación), Ed. Explosivos Rio Tinto, S.A. ERT, Pg. 43-77.
- [8] Revista del Plástico Digital, [http://www.plastico.com/tp/secciones/TP /ES/ MAIN/ IN /ARCHIVO/ARTICULOS/doc_5058_HTML.html?idDocumento=5058](http://www.plastico.com/tp/secciones/TP_ES_MAIN_IN_ARCHIVO/ARTICULOS/doc_5058_HTML.html?idDocumento=5058), consulta Agosto 2007.
- [9] Karande, Chum y Huang Journal of Plastic film and Sheeting 8, 1992; pp. 74-83.
- [10] <http://www.polinter.com.ve/index.asp?lng=&det=&cod =2006011500000009&edt=&prt =2006011400000008&admtab=>, POLINTER, 2007.

- [11] <http://www.telecable.es/personales/albatros1/quimica/industria/polietileno.htm>, 2007.
- [12] Enciclopedia del Plástico, Tomo 1 Capítulo 3
- [13] Rigaplast Industrias S.A., <http://www.rigaplast.com/paginas/materiales.htm>, Fabricación de Bolsas y bobinas de plástico, Julio 2007.
- [14] De la Peña Duran, Monografía: Películas Plásticas para la Envoltura de Alimentos, 1987 Saltillo, Coahuila Pag. 57-65.
- [15] Miscible Polymers Blend // <http://pslc.ws/spanish/blend.htm> // 2007.
- [16] Fayt, R., Hadjiandreou, P. and Teyssie, P., J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed., 1985, 23, 337 // <http://pslc.ws/spanish/blend.htm>.
- [17] POLINTER, Boletín Técnico de Poliolefinas Internacionales, C.A.: Mezclas LDPE-LLDPE para Empaque Industrial.
- [18] H. Mavridis, Blending of high-performance LLDPEs with butene-LLDPEs and LDPEs, Equistar Chemicals, LP.
- [19] R.F. Tate, G.R. Landvatter, J.V. Krohn, M. Dawe, HDPE Blending technology for enhanced LDPE film properties, Equistar Chemicals, LP- University of Cincinnati, May 2000.
- [20] <http://www.plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=5713>
- [21] Flores Laura, Control y Manejo periférico de Películas; Aumento de Capacidad en soplado de Película, Enero 2006.