

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANÁLISIS DEL PET

#### 2.1.1 DEFINICIÓN

El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, correspondiendo su fórmula a la de un poliéster aromático. Su denominación técnica es Polietilén Tereftalato o Politereftalato de etileno y forma parte del grupo de los termoplásticos, razón por la cual es posible reciclarlo.

El PET (Polietilén Tereftalato) perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres, fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. Se debe recordar que su país estaba en plena guerra y existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto. Recién a partir de 1946 se lo empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se lo comenzó a emplear en forma de film para el envasamiento de alimentos. Pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases rígidos, a partir de 1976; pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para el embotellado de bebidas carbonatadas.

#### 2.1.1.1 Producción del PET

El camino para cualquier plástico producido hoy en día es por medio de plantas petroquímicas, la mayoría de polímeros son el fin del producto de refinación y reformación del petróleo. Los productos petroquímicos son el 2.7% en volumen de cada barril de petróleo crudo.

El dimetilbenceno, conocido comúnmente como **xileno**, es un importante químico industrial. Ellos son utilizados en la manufactura de tintas, la producción de ácido benzoico y entre otros el ácido tereftalático puro (PTA). Se

trata de líquidos incoloros e inflamables con un característico olor parecido al tolueno.

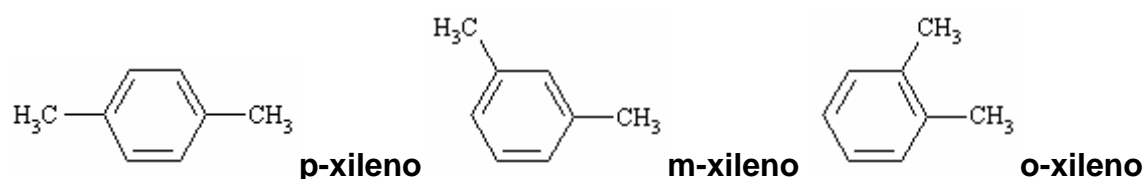


Fig. 2.1 Tipos de xileno

Los xilenos se encuentran en los gases de coque, en los gases obtenidos en la destilación seca de la madera (de allí su nombre: xilon significa madera en griego) y en algunos petróleos.

Este es usado en la reacción de polimerización, produciendo una larga familia de poliésteres. El polipropileno tereftalato (PET) es uno de ellos, éste comienza con los isómeros (variaciones de la molécula de un compuesto) del xileno.

El primer paso es recuperar el para-xileno utilizado para la producción de polímeros. Los tres isómeros del xileno, orto, meta y para-xileno, se separan a través de los puntos de ebullición, así:

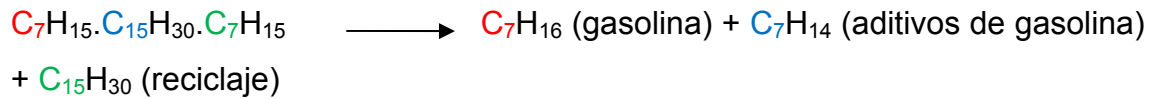
Tabla 2.1 Características de los tipos de xileno

<b>XILENOS</b>	<b>ORTO</b>	<b>META</b>	<b>PARA</b>
Punto de ebullición	144 °C	139.3 °C	137-138 °C
Punto de solidificación	-25 °C	-47.4 °C	13-14 °C

*Fuente: Industria del Plástico, Plástico Industrial.*

La reacción de romper la molécula incluye procesos de temperatura y **catálisis**. La catálisis es el proceso a través del cual se incrementa la velocidad de una reacción química. El proceso de catálisis implica la presencia de una sustancia que, si bien es cierto, es parte del sistema en reacción, la misma se puede llevar a cabo sin la primera. Ésta sustancia se llama **catalizador**. Un catalizador es una sustancia que aumenta la velocidad de una reacción,

reaccionando, regenerándose y que puede ser recuperado al final de la reacción. Si retarda la reacción se llama inhibidor. La rotura a través de catalizadores rompe la cadena larga de una molécula en pequeñas, ésta es la forma más utilizada en la actualidad, básicamente rompe la cadena de hidrocarburos para separar varios compuestos así:



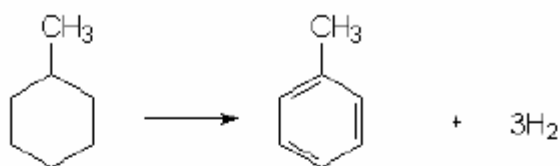
El procesamiento o reconversión es diseñado para romper las largas moléculas en pequeñas, combinar las pequeñas y crear nuevamente grandes moléculas a través de las reacciones de alquidación y polimerización y reorganizar la estructura molecular a través de la reformación.

La reacción para combinar moléculas es llamada alquidación y polimerización. En la alquidación los **alquenos** son unidos a compuestos aromáticos. Ésta reacción también permite cambios en las cadenas y en la composición física de las moléculas. Los alquenos son hidrocarburos que contienen el doble enlace carbono carbono.

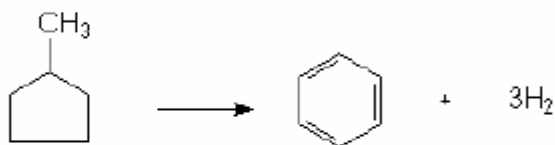
A través de las reacciones de polimerización las moléculas también pueden ser combinadas, en las cuales los alquenos son ligados juntos bajo la acción del calor, presión y un catalizador.

En este proceso, la nafta de refinación es convertida en una mezcla de compuestos conocidos como reformados. Son convertidos en alcanos, cicloalcanos y aromáticos. Los aromáticos son mezclados con benceno (16%), tolueno (47%) y xilenos (37%), algunos ejemplos:

### Dehydrogenation of cycloalkanes to aromatics



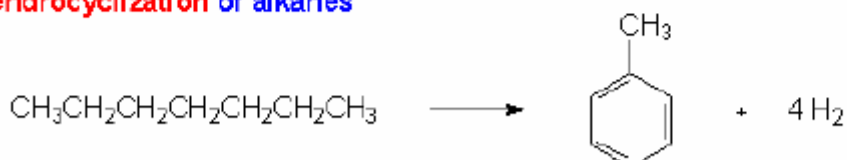
### Dehydroisomerization of cyclopentanes to aromatics



### Isomerization of alkanes



### Dehydrocyclization of alkanes



### Hydrocracking of alkanes

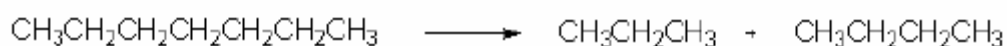


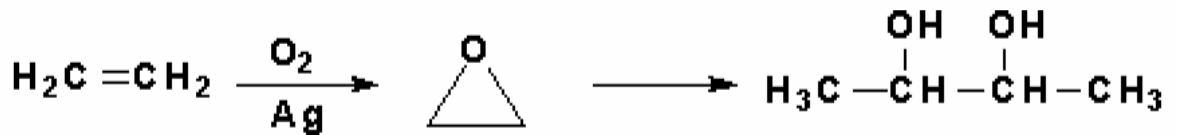
Fig. 2.2 Compuestos reformados

El proceso de refinación y reformación del petróleo crudo produce combustibles para las necesidades de transportación y generar calor, aceites lubricantes, asfalto para la construcción de caminos, así como petroquímicos. Una de la más importante manufactura de químicos involucra las reacciones de polimerización.

#### 2.1.1.2 Polimerización – Unión de las piezas

El para-xileno recuperado del petróleo crudo y producido a través de la conversión de reacciones es solo uno de los materiales para la síntesis del PET. Otros compuestos que son necesarios son el etileno, el cual es recuperado de la refinación del petróleo crudo.

El etileno, producido de una ruptura térmica es tratado con oxígeno en presencia de plata como catalizador para producir Óxido de Etileno, el cual, reacciona con el agua en presencia de un ácido para producir Etilen-glicol, uno de los monómeros necesarios. La reacción es la siguiente:



Primero el p-xileno es oxidado para producir el ácido terftálico (TA) que es posteriormente esterificado a terftalato de dimetilo (DMT). Esto puede lograrse mediante una secuencia de dos pasos en donde la oxidación es llevada a cabo por un catalizador de cobalto en presencia de metanol. Ambas reacciones se muestran a continuación. Esterificación es el proceso por el cual se sintetiza un éster, que es un compuesto derivado de la reacción química entre un oxácido y un alcohol.

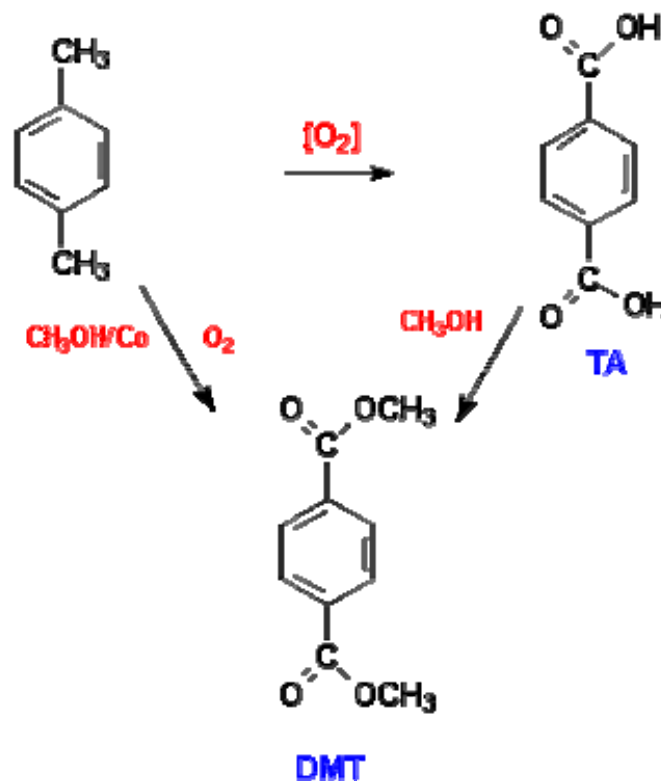


Fig. 2.3 Proceso de esterificación

Industrialmente, se puede partir de dos productos intermedios distintos:

TPA ácido tereftálico

DMT dimetiltereftalato

Haciendo reaccionar por esterificación TPA o DMT con glicol etilénico se obtiene el monómero Bis-beta-hidroxi-etil-tereftalato, el cual en una fase sucesiva, mediante policondensación, se polimeriza en PET según el esquema.

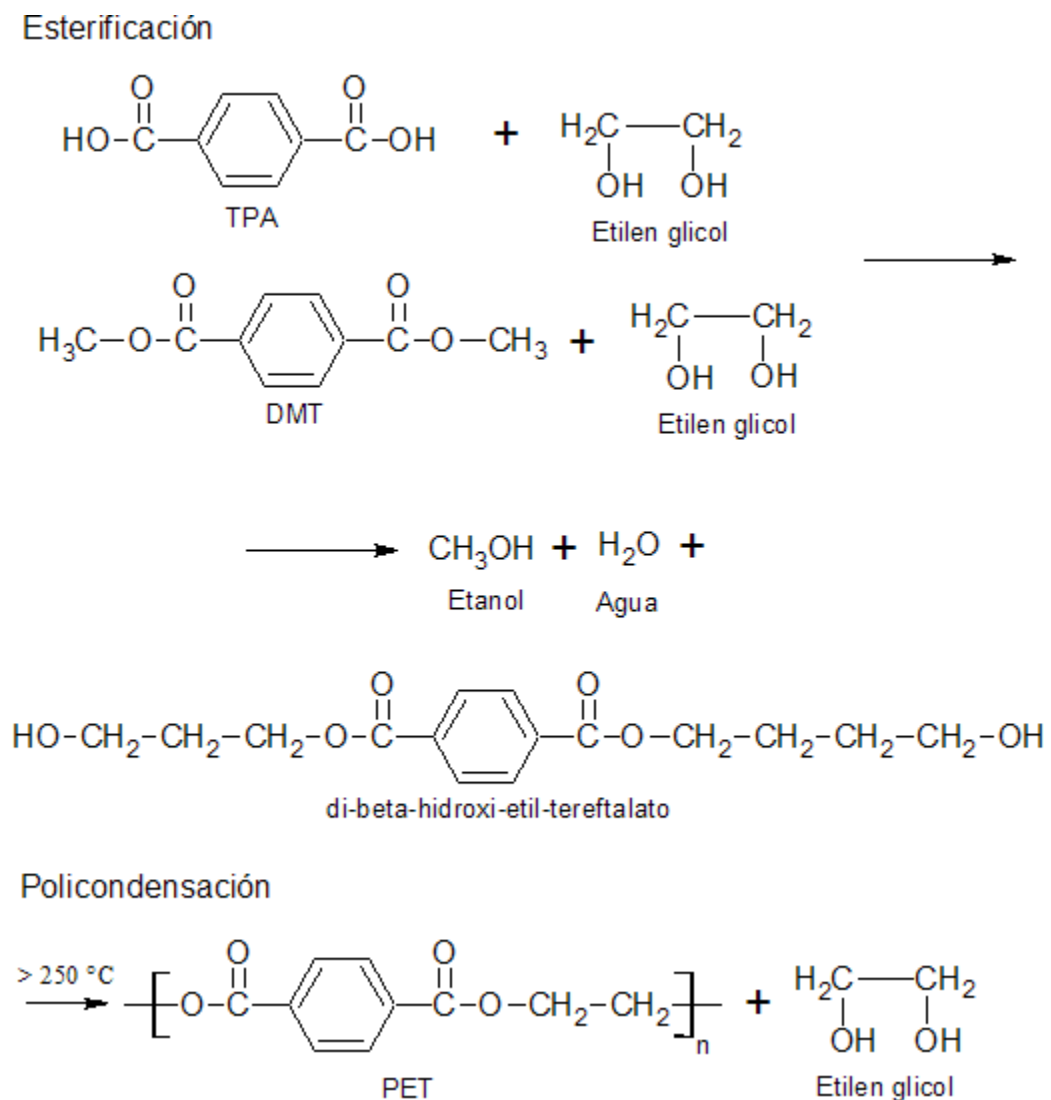


Fig. 2.4 Esquema de esterificación y policondensación de PET

En la reacción de **esterificación**, se elimina agua en el proceso del TPA y metanol en el proceso del DMT.

La reacción de **policondensación** se facilita mediante catalizadores y elevadas temperaturas (arriba de 270°C).

La eliminación del glicol etilénico es favorecida por el vacío que se aplica en la autoclave; el glicol recuperado se destila y vuelve al proceso de fabricación. Cuando la masa del polímero ha alcanzado la viscosidad deseada, registrada en un reómetro adecuado, se romperá el vacío, introduciendo nitrógeno en la autoclave. En este punto se detiene la reacción y la presencia del nitrógeno evita fenómenos de oxidación. La masa fundida, por efecto de una suave presión ejercida por el nitrógeno, es obligada a pasar a través de una matriz, en forma de spaghetti que, cayendo en una batea con agua se enfrían y consolidan. Los hilos que pasan por una cortadora, se reducen a gránulos, los cuales, tamizados y desempolvados se envían al almacenamiento y fabricación

El gránulo así obtenido es brillante y transparente porque es amorfo, tiene baja viscosidad, o sea un bajo peso molecular, I.V. = 0.55 a 0.65; para volverlo apto para la producción de botellas serán necesarios otros dos pasos (Cristalización y polimerización en estado sólido).

### **2.1.1.3 Cristalización**

Con este término se describe el cambio de estructura de los polímeros semicristalinos y que consiste en el fenómeno físico con el cual las macromoléculas pasan de una estructura en la cual su disposición espacial es desordenada (estructura amorfa, transparente a la luz) a una estructura uniforme y ordenada (estructura cristalina, opaca a la luz) que le confiere a la resina una coloración blanca lechosa. El proceso industrial consiste en un tratamiento térmico a 130- 160 °C, durante un tiempo que puede variar de 10 minutos a una hora, mientras el gránulo, para evitar su bloqueo, es mantenido en agitación por efecto de un lecho fluido o de un movimiento mecánico.

Con la cristalización, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm<sup>3</sup> del amorfo a 1.4 del cristalino.

### **2.1.1.4 Polimerización en estado sólido o Post polimerización**

El granulo cristalizado se carga en un reactor cilíndrico en cuyo interior, durante tiempos muy largos, es sometido a un flujo de gas inerte (nitrógeno) a temperatura elevada (sobre los 200 ° C).

Este tratamiento ceba una reacción de polimerización que hace aumentar posteriormente el peso molecular de la resina hasta los valores correspondientes de I.V. (0.72 – 0.86) idóneos para la fabricación de la botella. El aumento de la viscosidad intrínseca es directamente proporcional al aumento del peso molecular.

En esta reacción, mientras se ligan las moléculas, es eliminado parte del acetaldehído que se forma en la primera polimerización. Un buen polímero tiene valores de A.A inferiores a 1 ppm.

De estos reactores, se descarga PET de elevado porcentaje de cristalinidad (> 50) con viscosidad Grado para Botella (“Bottle Grade”).

#### **2.1.1.5 Tipos de polimerización**

Existen básicamente dos tipos de reacciones de polimerización:

##### **Polimerización de adición**

Los monómeros continúan añadiéndose a la cadena creciente una vez que comienza la reacción. Con ello se producen polímeros de alto peso molecular e incluye reacciones con intermedios iónicos o radicales libres.

##### **Polimerización de condensación**

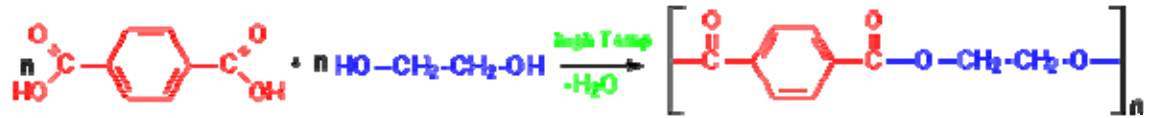
Implica una reacción de aglomeración en la cual los dos grupos funcionales reaccionan uno con otro para eliminar una molécula neutra pequeña, normalmente el agua. En esta polimerización se puede controlar el límite de longitud de la cadena dando lugar a polímeros de bajo peso molecular.

#### **2.1.1.6 Síntesis de poliésteres**

El Terftalato de Polietileno (PET) es un polímero poliéster. Los poliésteres pueden sintetizarse de dos formas. El primer método es una reacción directa



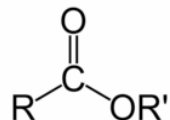
de un diácido con un diol (alcoholes que tienen dos grupos hidroxilos). Para producir el PET, el ácido terftálico reacciona con el etilen glicol segun se muestra debajo.



Esta reacción es una reacción típica de esterificación Fisher en la cual un ácido reacciona con un alcohol siguiendo el mecanismo usual de la reacción. El hecho de que cada molécula sea difuncional produce un polímero por la reacción.

La otra síntesis del PET implica un intercambio éster de un diéster y un diol.

En química, los **ésteres** son compuestos orgánicos en los cuales un grupo orgánico (simbolizado por R' abajo) reemplaza a un átomo de hidrógeno ( o más de uno) en un ácido oxigenado. Un ácido oxigenado es un ácido cuyas moléculas poseen un grupo OH- desde el cual el hidrógeno (H) puede disociarse como un ion protón (H+).



Esta es una reacción de **transesterificación** en el cual un éster se transforma en otro. La síntesis del PET por este método es la reacción de terftalato de dimetilo con el etilen glicol como sigue.

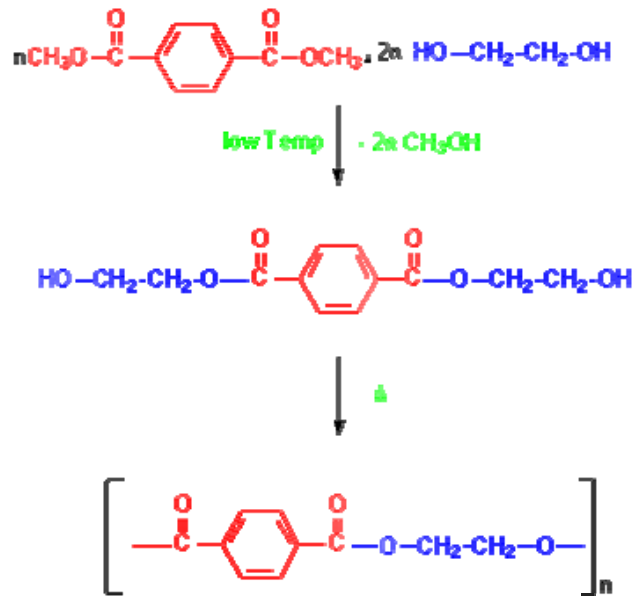
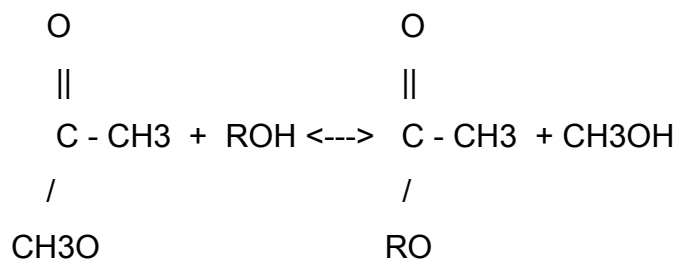


Fig. 2.5 Reacción de transesterificación

La transesterificación es el proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base.



(éster + alcohol <---> éster diferente + alcohol diferente)

La transesterificación es crucial para producir biodiésel a partir de los aceites vegetales o grasas animales.

### 2.1.2 PROPIEDADES

El PET en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. Existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad. Los que presentan menor peso molecular

se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y, de mayor peso molecular, grado ingeniería.

Este polímero no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles, también películas. Su punto de fusión es alto, lo que facilita su planchado, es resistente al ataque de polillas, bacterias y hongos.

El PET presenta las siguientes propiedades:

- Procesable por soplado, inyección y extrusión.
- Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- Transparencia (aunque admite cargas de colorantes) y brillo con efecto lupa.
- Alta resistencia al desgaste.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Biorientable – cristalizable.
- Esterilizable por rayos gamma y óxido de etileno.
- Buena relación costo / performance.
- Se encuentra ranqueado como No.1 en reciclado.
- Liviano.
- Cuenta con los siguientes datos técnicos:

Tabla 2.2 Datos técnicos del PET

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,34 – 1.39
Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0.01 – 0.04
Dureza	--	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10 <sup>-4</sup> / °C	15.2 – 24
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Velocidad de combustión	mm/min	Consumo lento
Efecto luz solar	--	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	--	Excelente
Calidad óptica	--	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244 - 254

Fuente: *Industria del Plástico. Plástico Industrial. Richardson & Lokensgard.*

### 2.1.3 CARACTERÍSTICAS

El PET presenta las siguientes características:

- **Biorientación**

Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.

- **Cristalización**

Permite lograr resistencia térmica para utilizar bandejas termoformadas en hornos a elevadas temperaturas de cocción.

- **Esterilización**

El PET resiste esterilización química con óxido de etileno y radiación gamma.

- **Resistencia química**

Presenta buena resistencia en general a: grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones,

hidrocarburos alifáticos y alcoholes. Posee poca resistencia a: solventes halogenados, aromáticos y cetonas de bajo peso molecular.

Tabla 2.3 Resistencia química del PET

**Alcoholes**

Metanol	muy resistente
Etanol	muy resistente
Isopropanol	resistente
Ciclohexanol	muy resistente
Glicol	muy resistente
Glicerina	muy resistente
Alcohol bencílico	resistente

**Aldehidos**

Acetaldehído	muy resistente
Formaldehído	muy resistente

**Carbonos**

Tetracloruro de carbono	muy resistente
Cloroformo	resistente
Difenil clorado	muy resistente
Tricloro etileno	muy resistente

**Disolventes**

Eter	muy resistente
Acetona	no resistente
Nitrobenzeno	no resistente
Fenol	no resistente

**Ácidos**

Acido formica	muy resistente
Acido acético	muy resistente
Acido Clorhídrico 10 %	resistente
Acido Clorhídrico 30 %	resistente
Acido Fluorhídrico 10 y 35 %	muy resistente
Acido Nítrico 10 %	muy resistente
Acido Nítrico 65 y 100 %	no resistente
Acido fosfórico 30 y 85 %	muy resistente
Acido sulfúrico 20%	resistente
Acido sulfúrico 80 % o más	no resistente
Anhídrido sulfuroso seco	muy resistente

**Soluciones acuosas alcalinas**

Hidróxido amónico	no resistente
Hidróxido cálcico	resistente
Hidróxido sódico	no resistente

Tabla 2.3 Resistencia química del PET (continuación)

<b>Sales (soluciones)</b>	
Dicromato	muy resistente
Carbonatos alcalinos	muy resistente
Cianuros	muy resistente
Fluoruros	muy resistente
<b>Sustancias varias</b>	
Cloro	muy resistente
Agua	muy resistente
Peróxido de hidrógeno	muy resistente
Oxígeno	muy resistente

*Fuente: Industria del Plástico, Plástico Industrial.*

– **Alternativas ecológicas**

- Retornabilidad
- Reuso de molienda
- Fibras
- Polioles para poliuretanos
- Poliésteres no saturados
- Envases no alimenticios
- Alcohólisis / Metanólisis
- Incineración

#### **2.1.4 VENTAJAS**

##### **Propiedades únicas**

Claridad, brillo, transparencia, barrera a gases u aromas, impacto, termoformabilidad, fácil de imprimir con tintas, permite cocción en microondas.

##### **Costo/Performance**

El precio del PET ha sufrido menos fluctuaciones que el de otros polímeros como PVC-PP-LDPE-GPPS en los últimos 5 años.

##### **Disponibilidad**

Hoy se produce PET en Sur y Norteamérica, Europa, Asia y Sudáfrica.

## **Reciclado**

El PET puede ser reciclado dando lugar al material conocido como RPET, lamentablemente el RPET no puede emplearse para producir envases para la industria alimenticia debido a que las temperaturas implicadas en el proceso no son lo suficientemente altas como para asegurar la esterilización del producto.

### **2.1.5 DESVENTAJAS**

#### **Secado**

Todo poliéster tiene que ser secado a fin de evitar pérdida de propiedades. La humedad del polímero al ingresar al proceso debe ser de máximo 0.005%

#### **Costo de equipamiento**

Los equipos de inyección por soplado con biorientación suponen una buena amortización en función de una gran producción. En extrusión por soplado se pueden utilizar equipos convencionales de PVC, teniendo más versatilidad en la producción de diferentes tamaños y formas.

#### **Temperatura**

Los poliésteres no mantienen buenas propiedades cuando se les somete a temperaturas superiores a los 70 grados. Se han logrado mejoras modificando los equipos para permitir llenado en caliente. Excepción: el PET cristalizado (opaco) tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230 °C.

#### **Intemperie**

No se aconseja el uso permanente en intemperie.

### **2.1.6 APLICACIONES**

#### **a) Envase y empaque**

Por su impermeabilidad a los gases, el PET abarca casi el 100% del mercado de botellas retornables y no retornables para bebidas carbonatadas. Las firmas

de maquinaria han contribuido en gran medida a impulsar la evolución de manera rápida de los envases, por lo que hoy se encuentran disponibles envases para llenado a temperaturas normales y para llenado en caliente; también se desarrollan envases muy pequeños desde 10 mililitros hasta garrafones de 19 litros. Los tarros de boca ancha son utilizados en el envasado de conservas alimenticias.

Entre los múltiples usos dados al PET, debido a su durabilidad, estabilidad dimensional e insensibilidad a la humedad excelentes, sobresale el destino que se le ha dado en la fabricación de envases de bebidas carbonatadas y de empaques de alimentos pues, no deteriora ni causa efectos de toxicidad a estos productos.

La participación del PET dentro de este mercado es en:

- Bebidas Carbonatadas
- Agua Purificada
- Aceite
- Conservas
- Cosméticos
- Detergentes y Productos Químicos
- Productos Farmacéuticos

#### **b) Electro-electrónico**

Este segmento abarca diversos tipos de películas y aplicaciones desde las películas ultradelgadas para capacitores de un micrómetro o menos hasta de 0.5 milímetros, utilizadas para aislamiento de motores.

Debido a su alta resistencia dieléctrica y mecánica, el PET se utiliza como aislante de ranuras y fases en motores, condensadores, bobinas y transformadores. Así también ha servido para ser utilizado en la fabricación de conectores eléctricos de alta densidad, bloques terminales, circuitos integrados y partes electromecánicas, reemplazando de este modo a los materiales termoestables.



### **c) Fibras (telas tejidas, cordeles, etc.)**

En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir. La ropa hecha con esta fibra es resistente a arrugarse. Estas fibras son conocidas como Dacron y Fortrel y son ampliamente usadas en bienes de consumo como ropa y telas.

Debido a su resistencia, el PET se emplea en telas tejidas y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas. Su baja elongación y alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras. Su resistencia química permite aplicarla en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales. El poliéster tiene también una aplicación médica, debido a su fuerza es utilizado en cirugías de reconstrucción de tejidos dañados.

### **d) Aplicaciones en la industria mecánica**

El PET se utiliza en la fabricación de repuestos que necesitan superficies duras, planas y buena estabilidad dimensional. Por ejemplo en engranajes, levas, cojinetes, pistones y en bastidores de bombas que soportan elevadas fuerzas de impacto.

Los compuestos reforzados de PET son usados para fabricar tapas de distribuidores y componentes de pintura exterior para automóviles.

### **e) Otras aplicaciones**

Se utiliza para bandejas de horno convencional o microondas, pero su principal uso es en botellas.

Tabla 2.4 Aplicaciones comunes del PET

#### **¿CÓMO SE USA EL PET?**

FIBRA	ALFOMBRA ROPA TELAS PARA DECORACIÓN (CORTINADOS, ROPA DE CAMA, TAPICERÍA, ETC)
-------	--

Tabla 2.4 Aplicaciones comunes del PET (continuación)

PACKAGING	BEBIDAS (GASEOSAS, AGUA MINERAL, JUGOS, ETC.) COMIDAS PERFUMERÍA Y COSMÉTICOS PRODUCTOS PARA EL HOGAR LICORES PRODUCTOS FARMACÉUTICOS
FILM	RADIOGRAFÍAS, TAPES DE VIDEO Y AUDIO

*Fuente: Industrial del Plástico, Plástico Industrial.*

## **2.2 PROCESO DE RECICLAJE MECÁNICO DEL PET**

Existen varios factores implicados en la elaboración y usos del PET que hacen que se considere como material no beneficioso para el medio ambiente. Los grandes volúmenes de producción actual de este material utilizan cantidades considerables de petróleo, una fuente valiosa y no renovable. Y el PET termina en artículos que finalmente necesitan una eliminación adecuada. De los más de 4 billones de libras producidas en 1998, sólo 745 millones de libras fueron recicladas<sup>1</sup>. El 81% restante, unos 3.25 billones de libras fueron llevadas a vertedero o incineradas. Parte de este bajo porcentaje de reciclado es consecuencia de la pérdida de programas de reciclado en muchas áreas. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes es el hecho de que bajo las tecnologías de reciclado existentes, conocidas como reciclado mecánico, la mayoría de estas 3.25 billones de libras no pueden reciclarse debido a que contienen cantidades significativas de impurezas como tintes y metales que interfieren con el procesado. Por lo tanto, este reciclado se facilita con el empleo de envases de PET transparente, ya que sin pigmentos tiene mayor valor y mayor variedad de usos en el mercado, evitando los envases multicapa, así como los recubrimientos de otros materiales, que reducen la reciclabilidad del PET, aumentando el empleo de tapones de polipropileno o polietileno de alta densidad y evitando los de aluminio o PVC que pueden contaminar grandes cantidades de PET, así como la inclusión de etiquetas fácilmente desprendibles en el proceso de lavado, evitando sistemas de impresión

---

<sup>1</sup> *PET Facts*, National Association for PET Container Resources. [www.napcor.com/toolbox/funfacts.html](http://www.napcor.com/toolbox/funfacts.html), accessed July 2000.

serigráfica que provocan que el PET reciclado y granulado tenga color, disminuyendo sus posibilidades de uso, mercados y precio, así como las etiquetas metalizadas o con pigmentos de metales pesados que contaminan el producto final.

El reciclado es el reproceso de los materiales, en este caso del PET, para acondicionarlos con el propósito de integrarlos nuevamente a un ciclo productivo como materia prima.

Con las tecnologías convencionales no es posible utilizar el PET para fabricar otra vez botellas de bebidas, debido a razones de higiene. Sin embargo, en los EE.UU. se ha desarrollado una nueva tecnología que permite despolimerizar el PET en sus dos componentes, el etilenglicol y el ácido tereftálico, y después repolimerizarlo como resina virgen para la producción de embalajes de alimento.

La secuencia del reciclado de envases PET consiste por lo general que, para recuperar el depósito de las botellas de refresco de PET, los consumidores las devuelven a los establecimientos, que clasifican los recipientes según el fabricante. Los conductores de los camiones de distribución de bebidas frecuentemente tienen que recoger grandes bolsas de plástico llenas de botellas de plástico vacías. Llevan las botellas a una instalación de tratamiento, en la que se clasifican los recipientes. Para reducir costes de envío, se utiliza un equipo de densificación para prensar botellas en balas que se venden después a compañías de reciclaje. Los encargados desembalan los recipientes, los trocean en copos, los limpian, los lavan, los secan y en algunos casos, vuelven a tratar los materiales.

La tarea de encontrar un uso para el PET reciclado no siempre ha sido sencilla. Por ejemplo, la estadounidense Food and Drug Administration (FDA) no permitió durante años el uso de materiales reciclados en aplicaciones destinadas al contacto con alimentos. Por consiguiente, había que utilizar el PET en aplicaciones que no implicaran tal contacto. Uno de los usos más importantes del PET reciclado fue la fibra. Así, 35 botellas de refresco

proporcionan el material suficiente para el relleno de fibra utilizado en un saco de dormir. Otros productos son los tejidos de poliéster para las camisetas y las sábanas.

### 2.2.1 SISTEMAS DE RECICLADO

Hay tres maneras de aprovechar los envases de PET una vez que terminó su vida útil: someterlos a un **reciclado mecánico**, a un **reciclado químico**, o a un **reciclado energético** empleándolos como fuente de energía. El ciclo de vida se muestra en este diagrama:



Fig. 2.6 Ciclo de vida de los envases PET

Con el fin de maximizar la utilidad que producen los plásticos, se han desarrollado técnicas que los separan según sus tipos. Estas técnicas se agrupan en las siguientes categorías:

– **Macroselección de componentes:**

Es aquella labor primaria que permite seleccionar y agrupar manual o automáticamente los artículos desechados de acuerdo con su naturaleza y destino. Un ejemplo de lo afirmado es la separación de las botellas PET que se utilizan en los refrescos de las PE-HD que se emplean en el envasado de leche.

La selección de los polímeros con fines de reutilizarlos se realiza, en parte, empleando la codificación y recomendaciones dadas por la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI), que clasifica a los polímeros en siete categorías a las que se asignan los siguientes números:





Nombre	Unidad monomérica	Siglas	Símbolo de reciclado
Polietilenterftalato	Etilen glicol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> ) Ácido tereftálico (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )(COOH) <sub>2</sub>	PET (PETE)	
			
Polietileno de alta densidad	$[-CH_2-CH_2]_n$	PEAD	
			

Fig. 2.7a Clasificación de los polímeros según la SPI

Nombre	Unidad monomérica	Siglas	Símbolo de reciclado
Cloruro de polivinilo	$(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$	PVC	
			
Polietileno de Baja Densidad	$[-\text{CH}_2-\text{CH}_2]_n$	PEBD	
			
Polipropileno	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	PP	
			
Poliestireno	$\text{CH}_2=\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)$	PS	
			

Fig. 2.7b Clasificación de los polímeros según la SPI

La identificación y agrupación de los polímeros mencionados se efectúa identificando al código que se encuentra moldeado o impreso, en el producto respectivo, dentro de un triángulo visible asimismo moldeado o impreso tal como se aprecia en los envases plásticos de gaseosas y en los envases Tetrapak.

– ***Microselección de componentes:***

La microselección anotada implica separar los polímeros en función de sus tipos, después de haber sido cortados y triturados en pequeños trozos.

Actualmente la microseparación comercial se aplica a las botellas PET de refrescos ya que es posible triturar la botella y separar los trozos de PET y de PE-HD para obtener un producto de alta calidad. Este procedimiento implica utilizar una tecnología de flotación extraída de la industria minera en la que los materiales se separan por flotación aprovechando las diferencias de densidad. La tecnología de hidrociclones, empleando la fuerza centrífuga para acelerar la separación gravitacional, puede aplicarse con bastante eficacia para separar polímeros en base a su densidad dentro de un medio acuoso.

Otra tecnología que presenta algún potencial para separar materiales a nivel micro es la trituración criogénica en la que polímeros se fracturan de forma distinta a temperaturas diferentes mediante su inmersión en nitrógeno líquido. Se puede provocar la fractura de los polímeros disímiles, y mediante ello, se posibilita la separación de materiales genéricos partiendo de una mezcla.

– ***Selección molecular:***

Este método de reciclaje consiste en separar los polímeros, por ejemplo algunos embalajes modernos que tienen uno o más de ellos, mediante sus disoluciones en una solución. El procedimiento se basa en la temperatura de disolución que tiene cada polímero que al final permite recuperarlos en capas.

Otro tipo de separación molecular consiste en despolimerizar el polímero en su monómero original. Algunos ésteres polímeros, como por ejemplo el tereftalato de polietileno (PET) y los metil – metacrilatos, se prestan a esta aproximación.

### **2.2.1.1 Reciclado mecánico**

Es el proceso de reciclado más utilizado, el cual consiste en varias etapas de separación, limpieza y molido como se muestra a continuación:



Fig. 2.8 Limpieza y separación de plásticos

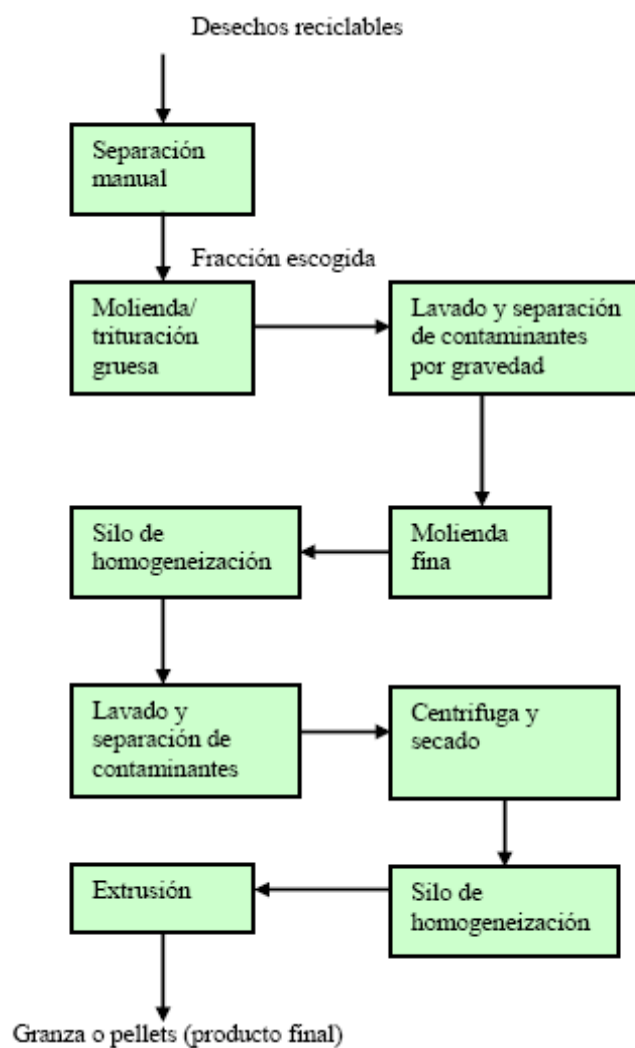


Fig. 2.9 Proceso de reciclado mecánico avanzado



Los plásticos escogidos y gruesamente limpiados (etiquetas, papeles, residuos de material biodegradable) pasan por un molino o una trituradora. Este proceso se puede realizar en diferentes órdenes de sucesión, dependiendo del grado de contaminación de los plásticos y de la calidad del producto reciclado. La preparación final del producto empieza con el lavado y la separación de sustancias contaminantes, proceso que se puede repetir si es necesario. Después el material pasa por una centrifuga y secadora y se almacena en un silo intermedio. En el caso ideal, este silo sirve también para homogeneizar más el material, al fin de obtener una calidad constante.

El producto triturado, limpio, seco y homogéneo se alimenta a una extrusora, y, tras el proceso de granceado, se obtiene la granza lista para ser procesada por diferentes técnicas. La granza de plásticos reciclados se puede utilizar de diferentes maneras, según los requerimientos para el producto final:

- Procesado del producto reciclado directamente, con la formulación que sea adecuada a su aplicación concreta. En este caso, las piezas obtenidas tienen en general propiedades menores a las fabricadas con polímero virgen, lo que es suficiente para la utilidad deseada.
- Mezcla de granza reciclada con polímero virgen para alcanzar las prestaciones requeridas. El ejemplo típico es la adición de polímero virgen a la mezcla de termoplásticos.
- Coextrusión del producto reciclado. Un ejemplo de esta técnica es la fabricación de recipientes para detergentes, en la que la capa intermedia puede ser de polímero reciclado y la interior (contacto con el producto) y la exterior son de polímero virgen.

### **Propiedades del PET reciclado mecánicamente**

Las diferencias en las propiedades del PET reciclado mecánicamente comparadas con las del PET virgen pueden ser atribuidas principalmente a la historia térmica adicional experimentada por el material reciclado, la cual da como resultado un decremento en el peso molecular, junto con un incremento en el ácido carboxílico, color y nivel de acetaldehído.

Estudios han demostrado que el RPET (PET reciclado) posee un módulo de Young menor, mayor elongación a la rotura y mayor resistencia al impacto que el PET virgen. Así, el RPET es más dúctil mientras el PET virgen es más frágil; este es un resultado de las diferencias en la cristalinidad entre los materiales.

Tabla 2.5 Características del PET y RPET

Propiedad	PET virgen	RPET
Módulo de Young [MPa]	1890	1630
Resistencia a la rotura [MPa]	47	24
Elongación a la rotura [%]	3,2	110
Resistencia al impacto [ $J m^{-1}$ ]	12	20
IV ( $dl g^{-1}$ )	0.72 – 0.84	0.46 – 0.76
Temperatura de fusión ( $^{\circ}C$ )	244 - 254	247 - 253
Peso molecular ( $g mol^{-1}$ )	81600	58400

*Fuente: Polymer Recycling, Recycling of PET.*

### 2.2.1.2 Reciclado químico

Para el reciclado químico, se han desarrollado distintos procesos. Dos de ellos, la metanólisis y la glicólisis, se llevan a cabo a escala industrial. El PET se deshace o despolimeriza: se separan las moléculas que lo componen y estas se emplean para fabricar otra vez PET. Dependiendo de su pureza, este material puede usarse, incluso, para el envasado de alimentos.



Fig. 2.10 Reciclado químico de envases PET

Dentro del reciclado químico los principales procesos son:

- **Pirólisis:** Es el craqueo de las moléculas por calentamiento en el vacío. Este proceso genera hidrocarburos líquidos o sólidos que pueden ser luego procesados en refinerías.
- **Hidrogenación:** En este caso los plásticos son tratados con hidrógeno y calor. Las cadenas poliméricas son rotas y convertidas en un petróleo sintético que puede ser utilizado en refinerías y plantas químicas.
- **Gasificación:** Los plásticos son calentados con aire o con oxígeno. Así se obtienen los siguientes gases de síntesis: monóxido de carbono e hidrógeno, que pueden ser utilizados para la producción de metanol o amoníaco o incluso como agentes para la producción de acero en hornos de venteo.
- **Chemolysis:** Este proceso se aplica a poliésteres, poliuretanos, poliacetales y poliamidas. Requiere altas cantidades separadas por tipo de resinas. Consiste en la aplicación de procesos solvolíticos como hidrólisis, glicólisis o alcoholólisis para reciclarlos y transformarlos nuevamente en sus monómeros básicos para la repolimerización en nuevos plásticos.
- **Metanólisis:** Es un avanzado proceso de reciclado que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster (el PET), es descompuesto en sus moléculas básicas, incluido el dimetiltereftalato y el etilenglicol, los cuales pueden ser luego repolimerizados para producir resina virgen. Varios productores de polietilentereftalato están intentando de desarrollar este proceso para utilizarlo en las botellas de bebidas carbonatadas. Las experiencias llevadas a cabo por empresas como Hoechst-Celanese, DuPont e Eastman han demostrado que los monómeros resultantes del reciclado químico son lo suficientemente puros para ser reutilizados en la fabricación de nuevas botellas de PET.

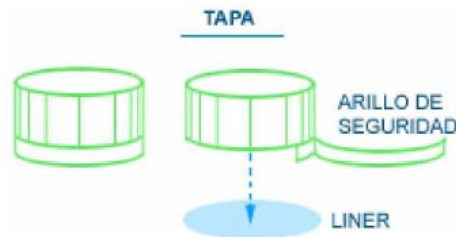
### 2.2.1.3 Reciclado energético

En cuanto al uso del PET como combustible alternativo, los envases pueden emplearse para generar energía ya que este material tiene un poder calorífico de 6.3 Kcal/Kg, y puede realizar una combustión eficiente. Esto es posible ya que durante su fabricación no se emplean aditivos ni modificadores, lo cual

permite que las emisiones de la combustión no sean tóxicas, obteniéndose tan sólo bióxido de carbono y vapor de agua.

#### **2.2.1.4 Recomendaciones para el reciclado del PET**

##### **1. La tapa, el arillo de seguridad y su empaque (liner o sello):**



Se recomienda que el arillo de seguridad se desprenda del cuello del envase y el empaque de la tapa (liner) se quede en la tapa a la hora de abrir el envase.

También se recomienda que la tapa, el arillo de seguridad y el liner sean de:

- Polipropileno (PP)
- Polietileno de alta densidad (PE-HD)

Estos materiales son preferibles al aluminio y a otros materiales. El PVC no es recomendable porque una pequeña cantidad de PVC puede contaminar grandes cantidades de PET dispuesto para su reciclado por su diferente temperatura de fusión o ablandamiento.

##### **2. Las etiquetas:**

Es preferible usar etiquetas de alguno de los siguientes materiales:

- Polipropileno (PP)
- Polietileno orientado (OPP)
- Polietileno de alta, media o baja densidad (PE-HD, PE-MD, PE-LD)
- Papel

Las etiquetas metalizadas dificultan el reciclado de cualquier plástico, pues al contener metales lo contaminan. Las etiquetas deben poder desprenderse en el proceso de lavado del reciclador, por lo que es importante seleccionar un adhesivo conveniente y evaluar las etiquetas termoajustables o a presión. Los sistemas de impresión serigráfica provocan que el PET reciclado y granulado tenga color, disminuyendo sus posibilidades de uso, mercados y precio. Se recomienda evitar pigmentos de metales pesados.

### **3. El color:**

La botella de PET transparente sin pigmentos tiene mejor valor y mayor variedad de usos; sin embargo, con una separación adecuada, el PET pigmentado tendrá ciertos usos.

### **4. Las multicapas o recubrimientos:**

Las capas que no son de PET en los envases multicapa, así como los recubrimientos de otros materiales, reducen la reciclabilidad del PET. Es necesario separar esta clase de envases de los de PET simple.

### **5. Las bandas de seguridad:**

Estos son generalmente incluidos en el diseño del producto envasado en PET, cuando se consideran necesarios, pero contaminan el PET para reciclar si no son removidos del envase desde la selección y separación del mismo. Se recomienda NO USAR PVC para fabricar estos elementos.

### **6. El diseño:**

Actualmente, los diseñadores tienen la oportunidad y la responsabilidad de entender el ciclo de vida y el impacto de los productos de PET. Por ello, la base de un buen diseño de envases es que sea lo más adecuado para su propósito, integrando lo más conveniente para el consumidor y asegurando una segunda vida útil.

### **2.2.2 APLICACIONES DEL RPET (PET RECICLADO)**

Los mercados para el PET reciclado pueden dividirse en dos áreas principales: (i) materiales con un peso molecular relativamente alto ( $IV > 0.65$ ); y (ii) materiales con un peso molecular menor ( $IV < 0.6$ ).

Uno de los factores que más está contribuyendo al desarrollo del reciclado del PET es la variedad de aplicaciones existentes, lo que determina que exista una importante demanda de este producto. Entre las más relevantes está la fibra textil, las láminas para fabricación de blísters y cajas, los flejes para productos voluminosos, los envases para productos no alimentarios, los envases multicapa para alimentos y los envases para alimentos.

#### **ALFOMBRAS**

Las botellas de PET para reciclar son usadas frecuentemente en la producción de nuevas alfombras de PET. Las industrias Image (Summerville, GA, USA) usan aproximadamente 60000 toneladas de PET reciclado por año en éste tipo de aplicaciones.

El PET reciclado es mezclado en una relación 1:8 con LDPE reciclado y extruído en cintas monoaxiales que luego son divididas en tiras que pueden ser tejidas para nuevas aplicaciones en alfombras.

#### **STRAPPING**

Strapping en inglés, es una cinta de gran tenacidad la cual puede ser producida de PET con una gran viscosidad intrínseca ( $> 0.80$ ) y mínima en contaminación. Compite con el acero y el polipropileno. Éste tipo de aplicación puede aceptar botellas de PET verdes o de color.

#### **LÁMINAS**

El PET reciclado de botellas de bebidas ha demostrado ser muy apropiado para bandejas de embalaje termo formado con buen brillo, esfuerzo de impacto y esfuerzo de tensión. Las cintas de embalaje para cámaras Polaroid están siendo producidas de láminas de PET. Las láminas de PET son un tipo de mercado en crecimiento, especialmente en Estados Unidos. Las industrias

Wellman no tienen objeción alguna por parte de la FDA para usar PET en recipientes en contacto con alimentos, por ser 100% reciclado. Éste tipo de láminas de PET termo formado además pueden ser usadas en fundas de detergente.

## **ROLLOS**

Los rollos de PET que contienen PET reciclado están disponibles bajo la marca registrada ECOTM (ICI Films, Wilmington, USA). La cinta ECO 813G tiene un contenido de 25% de material reciclado y ha recibido la autorización de la FDA para aplicaciones en contacto con alimentos.

## **ROLLOS MULTICAPAS – COEXTRUSIÓN**

Éste tipo de aplicación para envases termo formados para alimentos, constan de una capa interna de PET reciclado y dos capas externas de PET virgen, se producen en Norte América y Europa.

## **ENVASES QUE NO SON PARA ALIMENTOS**

Las botellas de PET para su aplicación post consumo, dependen de su calidad o si pueden ser mezcladas con resina virgen. Éstas son usadas para detergente o productos del hogar, estas botellas son de varios colores. Desde que el PET es competencia del PVC y HDPE en éste tipo de aplicaciones el mercado de precios es muy sensible.

## **MOLDEO A INYECCIÓN**

El PET reciclado no reforzado no tiene gran demanda como las resinas de moldeo a inyección porque es lento en la cristalización y es propenso a ser frágil. Se ha visto que mezclando PET reciclado con un elemento modificador como el etilen-etil, incrementa significativamente la resistencia del moldeo a inyección. En general el moldeo a inyección mezclado con resinas contribuye a un incremento en la resistencia del PET.

## **MOLDEO GRANDE**

El RPET puede ser usado para producir moldes a inyección plásticos. Desde que el PET tiene una gran módulo de flexión incluso más que la poliolefinas, la altura de los moldes se pueden incrementar comparado con los moldes PE.

## **RESINAS DE INGENIERÍA**

El RPET puede ser modernizado con elementos como la fibra de vidrio, y moldeado a inyección para producir partes para automóviles, cosas del hogar y aplicaciones computacionales como ventiladores, electrodomésticos y muebles.

Los polímeros ingenieriles pueden ser producidos también de mezclas de RPET con policarbonato (reciclado de botellas de agua). Estas mezclas combinan la ductilidad y la resistencia del policarbonato con la resistencia del PET para dar como resultado un material con mejores propiedades.

## **APLICACIONES DE FIBRA**

La industria de fibra de PET comprende cuatro áreas de mayor aplicación: staple fibre, filament, non-wovens y fibre-fill.

### ***Staple fibre***

El término Staple describe fibras de 5 – 150 mm de longitud y de 1 – 200 denier\*. Tradicionalmente, el PET reciclado ha sido usado para la producción de fibras de 6 denier de espesor en adelante, las cuales generalmente no son teñidas. Mientras los mercados de fibras mayores a 6 denier son significantes, el mercado mas extenso para las fibras de PET está entre el rango de 1.5 – 3 denier, el cual es usado en aplicaciones de ropa. En 1993, nuevas tecnologías de procesamiento permitieron que el PET reciclado sea usado en la producción de fibras mucho más finas (aproximadamente 3 denier). Esta fibra basada en PET reciclado ha sido comercializada bajo la marca de Ecospun<sup>TM</sup> por Wellman (Spijk, Holanda). Estas fibras requieren alta calidad de las escamas de PET post-consumo con una consistente viscosidad intrínseca de alrededor de 0.70. Un mercado potencialmente extenso para esta categoría de PET reciclado son las fibras de unión (fibras de diferentes componentes).



\* *Denier*: masa en gramos de 9000 m de fibra sintética en forma de un único filamento continuo.

### ***Filament***

Este tipo de fibra difiere de la “staple fibre” en que es vendida como una fibra continua enrollada sobre bobinas lo cual implica un precio más alto. El PET reciclado no está siendo usado significativamente para la producción de fibra *filament* puesto que los restos de contaminantes pueden causar la rotura de la fibra. La filtración en la fusión del PET es necesaria para asegurar alta calidad de la resina.

### ***Non-wovens***

Los tejidos *non-woven* pueden ser usados como filtros, absorbentes, equipo de campamento, etc. Este tipo de fibra es producida a través de un proceso especial: los trozos de botellas PET previamente limpiados son primero secados, cristalizados y alimentados dentro de una extrusora. El material fundido es filtrado y centrifugado. Los filamentos agrupados son modelados mediante chorros aerodinámicos. Para la formación de las redes los filamentos agrupados son extendidos y distribuidos sobre una banda transportadora la cual posee un fuerte vacío aplicado desde abajo lo que da como resultado un rápido enfriamiento por aire. Finalmente el material obtenido es comprimido, arrastrado continuamente, perforado y enrollado.

### ***Fibre-fill***

Fibre-fill es usado como un material de relleno o aislante en chaquetas impermeables, bolsas de dormir, almohadas y cubra camas. Esta aplicación puede aceptar escamas de PET coloreado y requiere PET con una viscosidad intrínseca en un rango de 0.58 – 0.65 dl g<sup>-1</sup>.

## **APLICACIONES DE CONTACTO CON ALIMENTOS PARA PET RECICLADO**

Ha existido un gran esfuerzo para obtener la aprobación del contacto con alimentos para el PET reciclado. Esto es porque, diferente del PE-HD, existen menos aplicaciones de “no contacto con alimentos” para las botellas de PET.

En agosto de 1994, se adoptó una importante medida. La Food and Drug Administration aprobó el uso de RPET al 100% para envases en contacto con alimentos. Se trataba de la primera vez que la FDA aprobaba envases para bebidas y alimentos de un 100% de material reciclado. Esto significa que las botellas de PET para refrescos se podían reprocesar para obtener botes nuevos para comida.

Para conseguir ésta aprobación, una instalación de reciclado de Michigan tuvo que desarrollar nuevos métodos para limpiar a fondo el material de reciclaje. El nuevo tratamiento se caracteriza por lavado de alta intensidad, temperaturas de aproximadamente 260 °C y otras técnicas de limpieza. Se desconoce aún si los materiales de contenedores urbanos quedarán bastante limpios como para ser viables económicamente por ésta misma vía.

Actualmente existen varios procesos que permiten utilizar el PET reciclado en este tipo de aplicaciones, entre los más importantes se tiene:

- **Proceso multicapa:** el proceso multicapa incorpora una capa de RPET entre dos capas de resina virgen. La base de este proceso es la producción de una multicapa preformada mediante un método de coinyección a través de boquillas concéntricas con inyección simultánea y secuencial.
- **Proceso de lavado SuperCycle™ (Johnson Controls, USA):** este proceso involucra un lavado de alta intensidad a elevadas temperaturas para producir resina que sea apropiada para aplicaciones de contacto con alimentos. Este tipo de proceso es menos costoso y requiere considerablemente un menor capital de inversión que el proceso multicapa.

## **2.3 PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS**

### **2.3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS**

La extrusión es uno de los métodos más antiguos para dar forma a los materiales plásticos con perfiles relativamente sencillos.

Es un proceso por compresión en el cual se fuerza al material a fluir a través del orificio de un dado para generar un producto largo y continuo cuya forma de la sección transversal queda determinada por la forma de la boquilla.

Dentro de la conformación de polímeros, la extrusión se usa ampliamente con termoplásticos y elastómeros, pero rara vez con termofijos, para producir masivamente artículos como tubos, ductos, láminas, películas, recubrimientos de alambres y cables eléctricos, perfiles estructurales como molduras de ventanas y puertas.

Para este tipo de productos, la extrusión se lleva a cabo con un proceso continuo; el producto se extruye y se corta inmediatamente en las longitudes deseadas.

Con la extrusión se realiza el mayor volumen de producción de polímeros, ya que no se usa solamente para la producción de barras, tubos, láminas y películas en materiales termoplásticos, sino también para el mezclado minucioso de todas las clases de plásticos y para la producción de gránulos; una diferencia importante con las extrusoras de metales es el uso de extrusores de tornillo.

Dos son los métodos de extrusión utilizados industrialmente: a) el moldeo por extrusión en húmedo y b) el moldeo por extrusión en seco, continuo o caliente. La extrusión en húmedo la practican solamente un número reducido de firmas, limitado a los compuestos de nitrocelulosa. La nitrocelulosa humedecida con alcohol se coloca en una mezcladora de acero junto con el disolvente y un plastificante; se pueden añadir color y pigmento, mezclando el conjunto hasta obtener una masa homogénea. El material se cuele, se seca al vacío para

recuperar una parte del disolvente y, finalmente se amasa en cilindros diferenciales. El material plástico se muele hasta que adquiera una consistencia semejante a la de jalea para ser moldeado por extrusión hidráulicamente, formando varillas y tubos, o también en una forma más dura que se pueda cortar en tiras para la máquina de extrusión del tipo de tornillo. En el comercio norteamericano, la máquina hidráulica se conoce con el nombre de embutidora, y el de tipo tornillo con el de “screw machine”.

El moldeo por extrusión en seco, continuo o caliente, utiliza polvos de moldeo termoplástico y máquinas de extrusión relativamente pequeñas, de un modelo usado antes para otros materiales, principalmente el caucho. Muchas de las distintas etapas de éste procedimiento están sujetas a regulación, ésta forma de extrusión no está normalizada.

### **2.3.2 EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS**

Las extrusoras más utilizadas, según la presión necesaria para hacer pasar el plástico fundido a través de la boquilla son:

a) Extrusoras de desplazamiento positivo:

- Extrusoras de pistón
- Bombas de extrusión (bombas de engranaje)

b) Extrusoras de fricción viscosa:

- Extrusora de tambor rotatorio
- Extrusora de rodillos
- Extrusora de tornillo

### ***Características de las extrusoras.***

**Extrusoras de pistón.-** Estas máquinas constan de un cilindro que posee elementos de calefacción, la materia prima desciende desde una tolva al interior del cilindro donde el material es plastificado. Éste es obligado a pasar a través de una boquilla, empujándolo con un pistón el cual es accionado por presión hidráulica o mecánica.

Las máquinas de un pistón producen piezas de longitud limitada, debido a la discontinuidad del proceso. Para fabricar perfiles continuos se utilizan las extrusoras de varios pistones

**Bombas de extrusión.-** Son bombas con algunos pares de engranajes que están acoplados y alojados en una carcasa; cuando se impulsa un engrane éste mueve el correlativo. El transporte del plástico se debe solo al empuje de los dientes sobre el material por el lado de la carcasa. El acoplamiento entre dientes aísla el lado de descarga a presión, del lado de succión. El flujo de material es proporcional a la frecuencia de rotación de los discos dentados obteniéndose así un flujo de material esencialmente constante.

**Extrusoras de tambor rotatorio.-** En esta máquina el material desciende por gravedad e ingresa por el émbolo hasta la cámara, la cual está formada por el tambor rotatorio y por el bastidor fijo o cuerpo estático.

El bastidor puede calentarse o enfriarse para controlar la temperatura. En la cámara el polímero es arrastrado por el cilindro rotor que lo pone en contacto con las paredes calientes del bastidor y con el material previamente fundido, con lo que se efectúa la plastificación.

La homogenización tiene lugar en la pequeña holgura radial entre el marco fijo y el cilindro que gira.

El plástico así fundido es separado del cilindro rotatorio mediante una pieza en forma de cuchilla; la fundición, bajo acción de las fuerzas tangenciales se mueve hacia la boquilla y la cruza.

**Extrusoras de rodillos.-** Consiste en dos rodillos horizontales cuyos ejes son paralelos entre sí, dichos cilindros son calentados por fuente externa y giran en sentido opuesto.

El polímero se alimenta por la parte superior de los rodillos, y al atravesar la holgura que existe entre estos es sometido a intensos esfuerzos de cizalla, a la vez se calienta y pasa fundido a la cámara inferior venciendo la presión creada en ésta y saliendo finalmente extruído por la boquilla. La cámara inferior consiste en unas placas laterales, apretadas firmemente a la superficie inferior de los rodillos, con lo cual se confina el polímero fundido, y éste no puede salir si no es a través de la boquilla.

**Extrusora de tornillo.-** Estas máquinas constan de un motor y un variador de velocidad para adecuar el giro del expulsor. El expulsor comprende un tornillo que rota dentro de una camisa calentada exteriormente.

El plástico en forma de gránulos, polvo o tiras, es alimentado constantemente desde una tolva situada sobre el cuerpo, el material pasa por un embudo al cilindro y a medida que avanza es calentado, mezclado y comprimido; y, cuando ha conseguido una consistencia moldeable, pasa a través de las boquillas u orificio formador.

La posición del cilindro y del tornillo es independiente en el proceso de extrusión. Por ello se utilizan las extrusoras verticales cuando se tienen espacios reducidos o cuando se requieren acoplar varias máquinas para elaborar productos constituidos por varios componentes.

Cuando se requiere una gran producción se utilizan extrusoras de varios husillos. La disposición y el número de dichos husillos es variada. En la mayoría de los casos los tornillos se encuentran mutuamente engranados,

entrando las espiras de uno en el canal del otro, con lo que se logra el movimiento obligado del material y la autolimpieza de los husillos.

### 2.3.3 DEFECTOS GENERADOS EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Los productos de extrusión pueden sufrir numerosos defectos. Uno de los peores es la fractura de fusión, en la cual los esfuerzos que actúan sobre la fusión inmediatamente antes y durante el flujo, a través del dado, son tan altos que causan rupturas que originan una superficie altamente irregular.

Como se indica en la fig. 2.11, la fractura de fusión puede ser causada por una aguda reducción en la entrada del dado que causan un flujo turbulento y rompe la fusión. Esto contrasta con el flujo laminar uniforme en el dado gradualmente convergente.

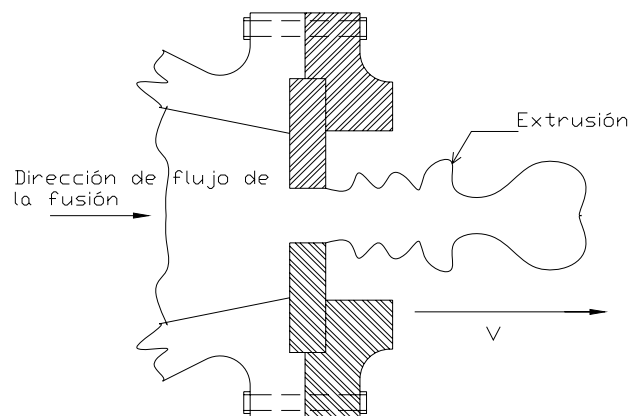


Fig. 2.11 Fractura de la fusión, causada por flujo turbulento en la fusión a través de una aguda reducción a la entrada del dado

Un defecto muy común en extrusión es la *piel de tiburón*, en la cual la superficie del producto se arruga al salir del dado. Conforme la fusión atraviesa la abertura del dado, la fricción con la pared produce un perfil diferencial de velocidades a través de la sección transversal, lo que se puede observar en la figura siguiente. Esto ocasiona esfuerzos tensiles en la superficie del material que se estira para igualar el movimiento más rápido del núcleo central. Estos esfuerzos causan rupturas menores que arrugan la superficie.

Si el gradiente de velocidad se vuelve más grande, se forman marcas prominentes en la superficie que dan la apariencia de un tallo de bambú, que es el nombre como se conoce a este defecto más severo.

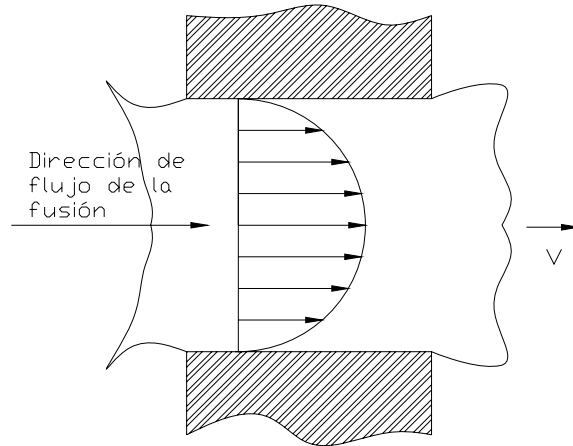


Fig. 2.12 Perfil de velocidades de la fusión al fluir a través de la abertura del dado, el cual puede conducir el defecto llamado piel de tiburón

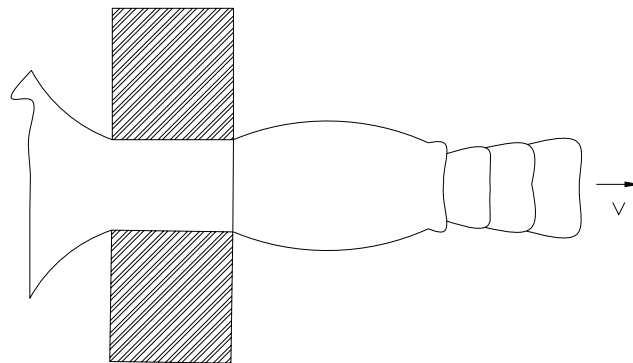


Fig. 2.13 Formación del tallo de bambú

### ***Contracción del material***

Las irregularidades en la pared de la máquina extrusora pueden crear tensiones en la pieza moldeada. Las zonas gruesas tardan más en enfriarse que las delgadas y pueden causar rechupados, así como contracción diferencial en los plásticos cristalinos. Por regla general los plásticos cristalinos moldeados por inyección tienen una alta contracción, mientras que los amorfos se contraen menos.



Se debe ejercer una presión para introducir el material por las zonas más estrechas, hecho al que se suma el problema de la contracción del material. Los polietilenos, los poliacetales, las poliamidas, los polipropilenos y algunos polivinilos se contraen de 0.50 a 0.76 mm tras el moldeo. Los moldes para éstos plásticos cristalinos y éstos amorfos deben dar cabida a la contracción del material.

### 2.3.4 MÁQUINA EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE

#### 2.3.4.1 Características principales

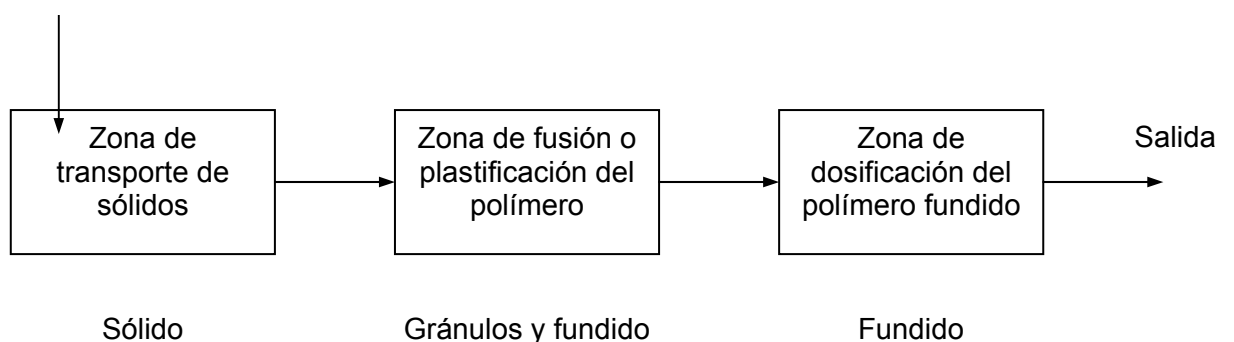
El polímero se alimenta en forma de gránulos, escamas o polvo. El material se calienta a medida que avanza a lo largo del tornillo y se transforma en un fluido muy viscoso hacia la parte media del tornillo.

El movimiento del tornillo genera sobre el fluido la presión necesaria para hacerle salir por la boquilla, en donde toma la forma deseada. Al salir de la boquilla el perfil extruido es enfriado, cortado o enrollado y almacenado.

A los extrusores alimentados con polímeros sólidos se los llama “extrusores plastificadores”, los cuales realizan las tres operaciones siguientes: transporte de sólidos, fusión o plastificación del polímero y, finalmente, el bombeo o dosificación del polímero fundido.

En extrusores de husillo simple, el polímero atraviesa 3 estados físicos: sólido, mezcla de material sólido con masa caliente y en el extremo del cabezal se transforma en material fundido.

Alimentación



Para que la zona de bombeo se llene totalmente con la fundición el volumen de la zona de transporte de sólidos debe ser mayor que el de la zona de bombeo. Este requisito se dicta por la diferencia entre el peso del material a granel (densidad esponjada) y el peso específico (densidad verdadera) de la fundición.

Para variar el volumen del canal se pueden tener 3 formas básicas del tornillo extrusor<sup>2</sup>:

- a) Tornillo de diámetro constante, pero con paso variable entre anillos.
- b) Tornillo con diámetro variable, estrechándose hacia la salida.
- c) Tornillo con espacios uniformes entre anillos y diámetros gradualmente descendentes (tornillo cónico).

La relación entre el volumen del canal en el largo de la primera espira en la zona de carga y el valor al final de la zona dosificadora se llama **coeficiente de compresión (i)**.

## **TRANSPORTE DE SÓLIDOS**

El transporte de sólidos tiene lugar en la primera zona del tornillo extrusor plastificador. Debajo de la tolva de alimentación el tornillo actúa como un elemento transportador en donde las partículas sólidas del polímero por acción de la pared conductora del roscado se trasladan a cierta distancia conservando su forma en el sector dado, las partículas individuales, idealmente siguen trayectorias rectas y paralelas al eje de tornillo.

## **ZONA DE PLASTIFICACIÓN**

Es una zona en la cual coexisten polímero sólido y polímero fundido. La fusión del polímero es gradual. Los gránulos sólidos alimentados por la tolva se mueven hacia la boquilla atravesando primero la zona de transporte.

---

<sup>2</sup> Delmonte, J. Moldeo de Plásticos, 2da edición, Barcelona, Editorial José Montesó, 1987, 449p.

En cierto punto de ésta zona, los gránulos sólidos del polímero tocan la superficie caliente del cilindro, funden y forman una película de polímero fundido sobre la superficie del cilindro (fig. 2.14); durante ésta etapa del proceso la transferencia de calor es lenta, ya que la masa sólida porosa situada debajo de la película fundida ofrece un pobre paso para el flujo de calor.

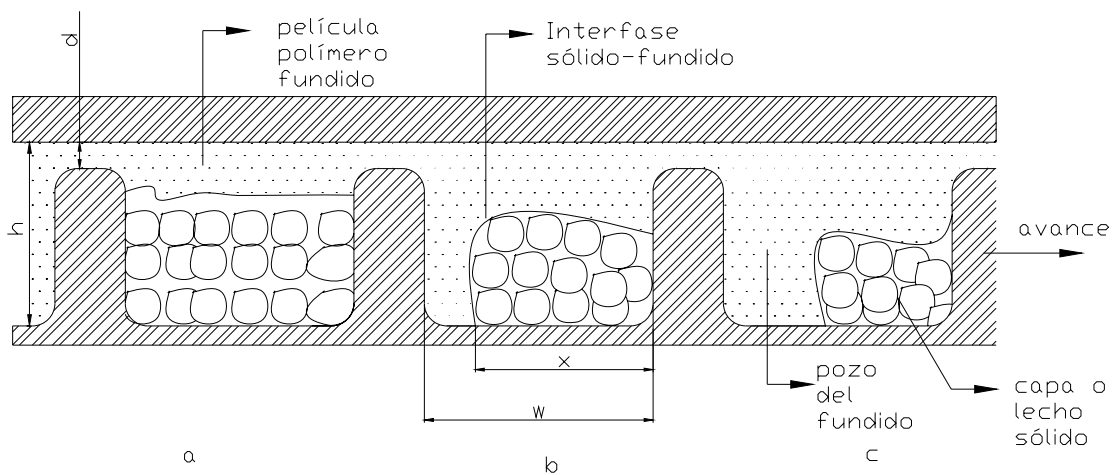


Fig. 2.14 Mecanismo de fusión en el canal del tornillo

- x: ancho de la capa sólida
- w: ancho del canal
- h: altura del filete
- d: holgura radial

La superficie del cilindro se mueve respecto al tornillo (y respecto a la capa sólida) con lo que se crea un gradiente de velocidad en la película fundida situada entre la capa sólida y la superficie del cilindro. Así el polímero fundido en la película comienza a fluir hacia el filete que avanza y cuando lo encuentre, éste barre el fundido y lo separa del cilindro. (fig. 2.14b).

El polímero fundido se acumula en un pozo situado en la parte posterior del canal delante del filete que avanza. A medida que la capa sólida se desliza por el canal se va acumulando más material fundido en dicho pozo, el tamaño de éste aumenta, mientras que el ancho de la capa sólida va disminuyendo (fig. 2.14c)

Las partículas sin fundir son arrastradas por este flujo, se encuentran rodeadas de material fundido y caliente y funden con mayor rapidez. La transmisión de calor entre cilindro y fundido es buena debido al movimiento del fluido; una vez que se ha alcanzado éste estado, la fusión tiene lugar rápidamente.

La existencia de la capa sólida en forma de larga pieza helicoidal explica también la eliminación del aire atrapado entre las partículas. A medida que la capa sólida funde gradualmente en la interfase hay tiempo suficiente para que el aire atrapado entre las partículas escape hacia el exterior vía la tolva de alimentación del extrusor.

### **ZONA DE BOMBEO**

Conocida también como “zona de dosificación” es la zona en la cual, al flujo de material fundido se le pueden aplicar las leyes hidrodinámicas para líquidos viscosos.

El estudio se simplifica considerando tres tipos de flujos, estos son: el directo y el inverso o de retroceso a lo largo del canal helicoidal del husillo, y el correspondiente a las fugas de la masa que tienen lugar a través del ajuste entre las crestas de los filetes del husillo y la superficie interior del cilindro.

El **flujo directo** o flujo de fricción, es debido al rozamiento del material con el tornillo y con las paredes del cilindro. Este material está sometido a deformaciones por cizallamiento que las paredes del canal helicoidal transforman en movimiento de avance hacia la boquilla.

El caudal volumétrico del flujo directo viene determinado fundamentalmente por la profundidad y anchura del canal, diámetro del husillo y su velocidad de giro.

El **flujo de retroceso**, opuesto al anterior, es debido a la presión originada en la cabeza de la máquina extrusora, esta presión es generada por la presencia de una restricción, tal como la boquilla y los platos rompedores. Este flujo depende de la profundidad del canal helicoidal, del diámetro del tornillo, de la

longitud del tornillo de extrusión, de la presión ejercida por la masa fundida sobre la cabeza extrusionadora y de la viscosidad del polímero.

El **flujo de pérdidas**, también opuesto al flujo de fricción, es creado por el gradiente de presión a lo largo del tornillo. El flujo total está dado la suma algebraica de los tres flujos anteriores:

$$Q_{TOTAL} = Q_{FRICCIÓN} - Q_{RETROCESO} - Q_{PÉRDIDAS}$$

Si solamente existiera el flujo de fricción debido a que el material fundido en los canales del tornillo se adhiere a las paredes internas del cilindro y al propio tornillo en rotación, el perfil de velocidades sería aproximadamente lineal:

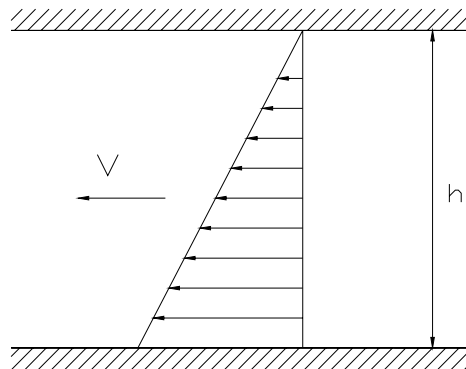


Fig. 2.15 Flujo de fricción

El flujo de retroceso se origina por el gradiente de presión a lo largo del cilindro, este tiende a hacer fluir el material hacia atrás a lo largo del canal del tornillo. El perfil de velocidades debido a este gradiente de presión se muestra en la fig. 2.16 donde se observa que se opone al flujo de fricción.

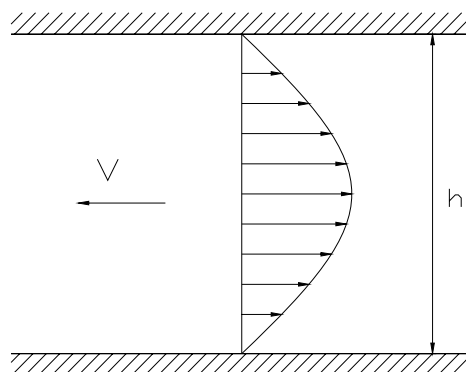


Fig. 2.16 Flujo de retroceso

El flujo de pérdidas lo despreciamos por ser mucho menor a los anteriores. Sumando algebraicamente los dos perfiles anteriores, obtenemos el flujo total del material a lo largo del tornillo:

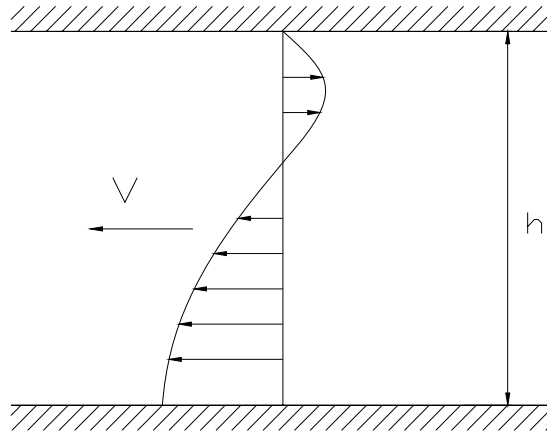


Fig. 2.17 Flujo total

### 2.3.4.2 Componentes

En las figuras 2.18 y 2.19 se muestran prensas extrusoras de tornillo simple típicas. A pesar de que con la instrumentación informatizada se ha perfeccionado el control del proceso, el diseño básico de las extrusoras de un solo tornillo no ha cambiado durante décadas. La medida de referencia de una máquina extrusora es el diámetro del tornillo, que en las máquinas pequeñas es de 19 mm y en las grandes de 300 mm. Las máquinas corrientes tienen un tamaño de 64 a 76 mm.

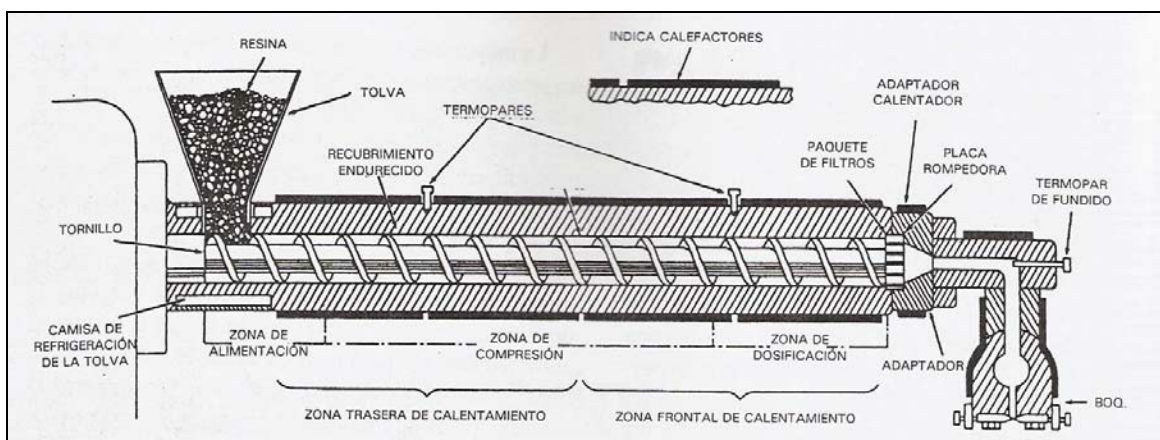


Fig. 2.18 Sección transversal de una prensa extrusora típica, con la boquilla hacia abajo

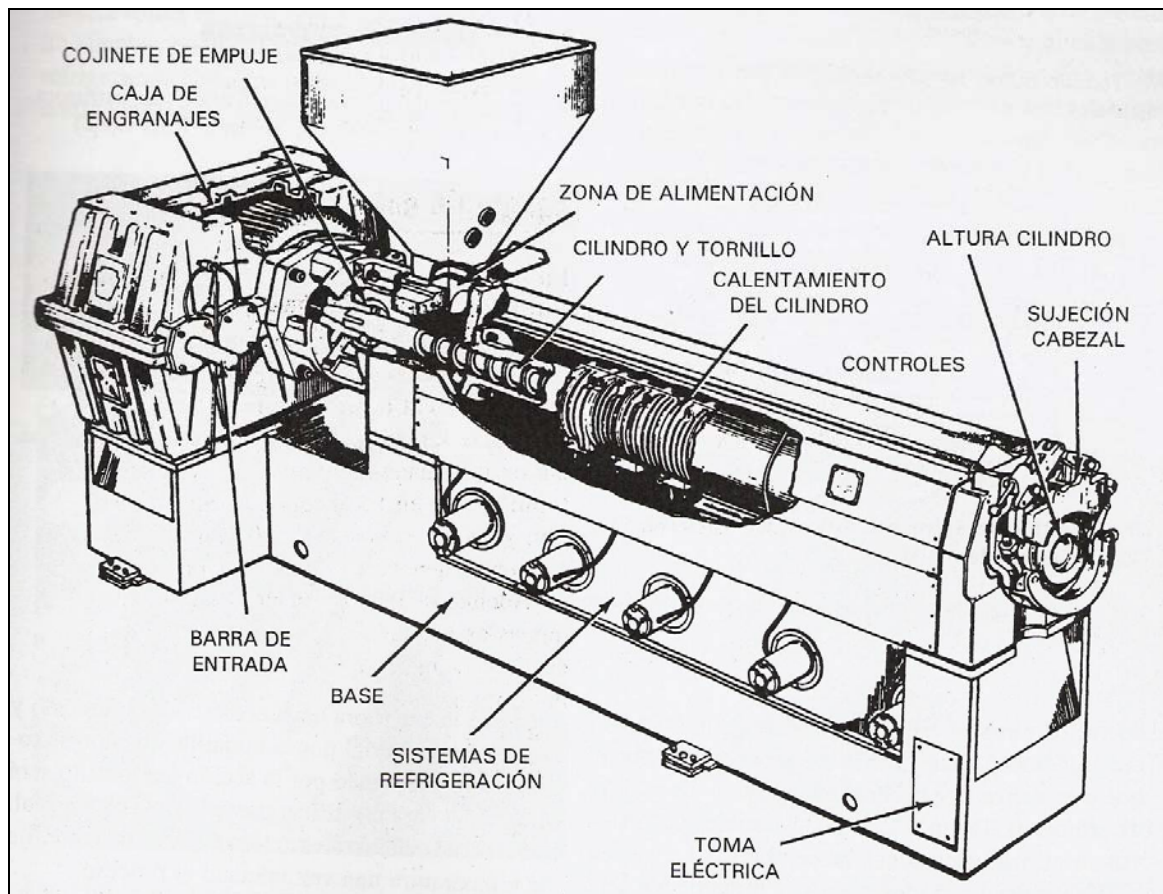


Fig. 2.19 Extrusora, con indicación de sus elementos

Además de por el diámetro del tornillo, las máquinas extrusoras se valoran en el mercado por la cantidad de material que pueden plastificar por minuto o por hora. La capacidad de extrusión en el caso del polietileno de baja densidad puede oscilar entre menos de 2 kg y más de 5000 kg por hora.

Los tornillos se caracterizan por su relación L/D, de manera que una proporción 20:1 significa un diámetro de 50 mm y 1000 mm de longitud. Los tornillos cortos que tienen, por ejemplo, una relación L/D de 16:1, suelen ser apropiados para extruir perfiles; en cambio, los largos, de hasta 40:1, mezclan mejor los materiales. En la figura 2.20 se muestran algunos diseños de tornillos.

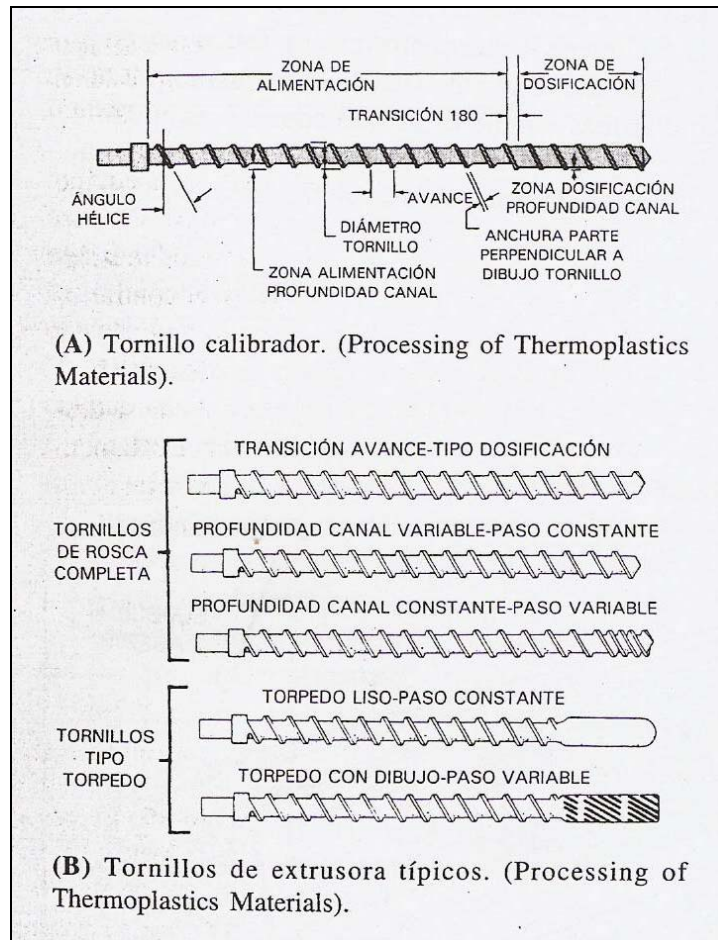


Fig. 2.20 Tornillos de extrusora típicos

La profundidad de canal del tornillo es muy pronunciada en la zona de alimentación para permitir su paso entre las granzas o pelets y otras formas de material y disminuye según se acerca a la zona de transición. De esta forma la reducción continúa, gracias a lo cual se favorece la expulsión del aire y la compactación del material (Fig. 2.20a). En la zona de dosificación, el dibujo en espiral superficial permite que se complete el fundido de los plásticos. En el extremo del tambor, una placa rompedora actúa como sello mecánico entre el tambor y la boquilla. Al mismo tiempo, la placa rompedora mantiene el paquete de filtros en la posición correcta. Varios tamices juntos se denominan paquete de filtro y sirven para eliminar trozos de material extraño. Cuando se obturan los filtros, aumenta la contrapresión.



La mayoría de las extrusoras están equipadas con un intercambiador de filtros. El más típico consiste en una placa que se desplaza de un lado a otro. Al colocar un paquete de filtros en posición quedan expuestos los tamices contaminados. Entonces, se retiran los tamices sucios y se instalan otros nuevos, de manera que el intercambiador queda preparado. Algunas máquinas están equipadas con una cinta continua de filtro (a veces giratoria) que se puede controlar automáticamente para mantener una presión de cabezal constante con independencia de los distintos niveles de contaminación del polímero y otras condiciones de la velocidad de flujo.

Después de pasar por la placa rompedora y los filtros, el plástico fundido entra en la boquilla que es realmente la que conforma el plástico derretido a medida que va saliendo de la extrusora. La boquilla más simple es la que consiste en un solo ramal, por donde se extruye un hilo algo más grande que el diámetro de la boquilla. Las que constan de varios ramales crean varios hilos simultáneamente. Pueden estar hechas de acero suave, aunque para series largas conviene que sean de acero de cromo-molibdeno. Con los materiales corrosivos se utilizan aleaciones inoxidables.

Se emplean radiadores eléctricos alrededor del cilindro para favorecer el fundido del plástico. Una vez que la extrusora haya combinado, mezclado y forzado el material por la boquilla, el calor de rozamiento producido por la acción del tornillo será suficiente para plastificar parcialmente el material. Se utilizan calefactores externos para mantener fija la temperatura una vez iniciado el proceso.

De acuerdo a las zonas por las que atraviesa el material, se tienen los siguientes componentes:

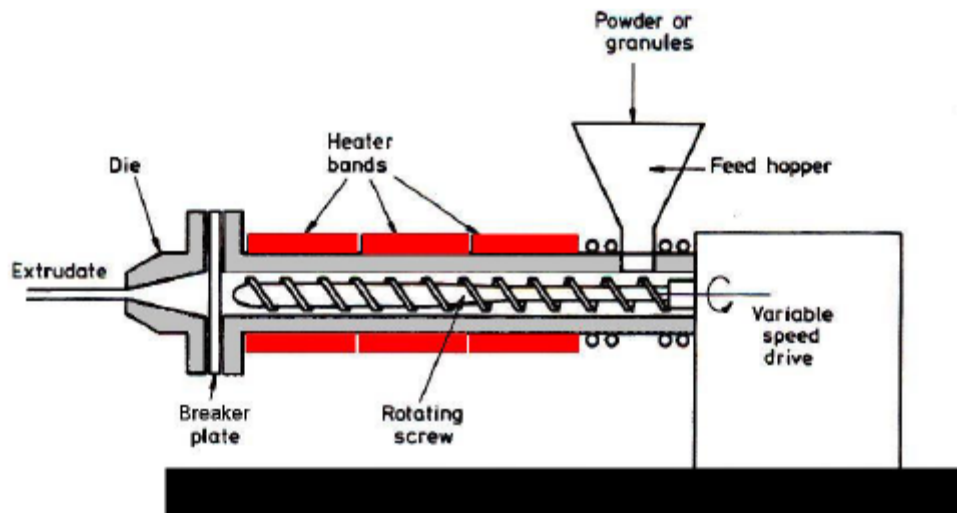


Fig. 2.21 Componentes principales de una extrusora

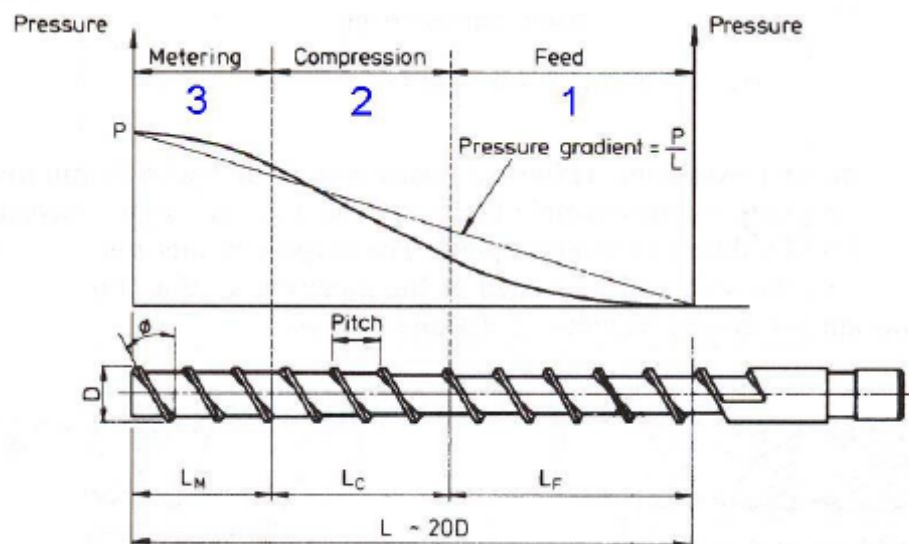


Fig. 2.22 Zonas por las que atraviesa el material

– **Tolva (hopper)**. Puede disponer de sistema de calefacción y/o secado para materiales higroscópicos.

**1. Zona de alimentación (feed zone)**: husillo cilíndrico. Se produce el transporte del material y se precalienta por el rozamiento entre granos.

**2. Zona de compresión o plastificación (compression zone):** husillo troncocónico. La altura de los filetes del husillo se reduce progresivamente para compactar el material y expulsar el aire atrapado hacia la zona de alimentación.

**3. Zona de dosificación o bombeo (metering zone):** husillo cilíndrico.

– **Plato rompedor (breaker plate):** placas perforadas + tamices metálicos.

– **Boquilla o hilera (die):** contiene torpedo para perfiles huecos.

### 2.3.4.3 Parámetros del proceso de extrusión

Los principales parámetros del proceso de extrusión se dividen en dos grupos:

– **Parámetros de diseño:** son aquellos que definen la geometría del tornillo y del cilindro: diámetro  $D$ , profundidad del canal  $h$ , y el ángulo de la hélice  $\theta$ . Estos factores no se pueden cambiar durante el proceso de operación de una extrusora.

– **Parámetros operativos:** son aquellos que se pueden cambiar durante el proceso para efectuar el flujo de salida; estos incluyen la velocidad de rotación  $N$ , presión estática  $p$ , y la viscosidad de la fusión  $\eta$ . La viscosidad de fusión solamente es controlable a medida que pueda manipularse la temperatura y la velocidad de corte para modificar esta propiedad.

Para determinar los principales parámetros de una máquina extrusora se necesita realizar un análisis matemático sobre el polímero fundido en la zona de bombeo. Este análisis se realiza a continuación:

#### 2.3.4.3.1 Características de los materiales plásticos

##### ***Tipos de Fluidos***

Un fluido newtoniano cumple con la ley de rozamiento de Newton, que afirma que un fluido sometido a un esfuerzo cortante se deforma de manera directamente proporcional a dicho esfuerzo:

$$T = \mu \cdot \gamma \quad (2.1)$$

Donde:

$T$  = Esfuerzo cortante ( $\text{Kgf}/\text{cm}^2$ )

$\mu$  = Constante de proporcionalidad llamada viscosidad ( $\text{Kgf}\cdot\text{sg}/\text{cm}^2$ )

$\gamma$  = Velocidad de cizalla ( $\text{sg}^{-1}$ )

Los fluidos no newtonianos no siguen la relación directa entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación dada por la ecuación (2.1), el comportamiento de éste tipo de fluidos es descrito mediante el uso de diferentes relaciones empíricas. Los termoplásticos, son fluidos no newtonianos que cumplen con la ley potencial de "Ostwald", la cual puede describirse como:

$$T = C \cdot \gamma^n \text{ en donde } n < 1 \quad (2.2)$$

Donde  $C$  y  $n$  son constantes que dependen del polímero y de las unidades en que se expresan los valores para  $T$  y para  $\gamma$ . La consistencia del material lo caracteriza  $C$  y el exponente  $n$ , es una medida de la vibración de los fluidos newtonianos.

A los materiales que cumplen con la ley de Ostwald se los conoce como pseudoplásticos.

El valor de  $n$  en el caso de termoplásticos fundidos que fluyen a través de una boquilla de extrusión suele estar entre 0.25 y 1<sup>3</sup>.

Definiendo la viscosidad aparente como:

$$\mu_a = T / \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Reemplazando  $T$  de (2.2) en (2.3), se obtiene:

$$\mu_a = C \cdot \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2.4)$$

### ***Hinchamiento del fundido a la salida de la boquilla***

En el interior de la boquilla el polímero fundido está sometido a esfuerzos y presión, por lo cual sufre cierta deformación. El hinchado de fabricación ocurre bajo la acción de las tensiones normales, perpendiculares al curso del flujo. Estas tensiones se originan a consecuencia de la intención de las moléculas orientadas de pasar al estado sin tensión. Los defectos y la desfiguración de la forma del extruido son debido al relajamiento de las tensiones de su componente elástica. Se puede definir una “relación de hinchamiento” como la relación entre una dimensión transversal del extruido y la análoga dimensión en el plano de salida de la boquilla.

La capacidad de extrusión  $Q$  que fluye a través de una boquilla perfiladora en la que se produce una caída de presión  $\Delta P$ , se evalúa de modo sencillo, empleando una ecuación análoga a la del flujo newtoniano, en condiciones isotermas, que puede escribirse así:

$$Q = K(\Delta P / \mu_a) \quad (2.5)$$

Donde  $K$ , es la constante total de la boquilla, que depende de la configuración y dimensiones de sus diferentes elementos. Para determinar la caída de presión en el cabezal, este se divide convencionalmente en sucesivas zonas de

---

<sup>3</sup> Mark, H. Gaylord, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, USA, Editorial John Wiley & Sons Inc., 1968, Vol. 14, 435 p.

diferente configuración, estableciendo para cada una de éstas zonas el gradiente de presión.

#### 2.3.4.3.2 Teoría matemática del flujo

Al aplicar conjuntamente las ecuaciones correspondientes a las leyes de la conservación de la masa y la energía, con las que se describe el estado físico de un líquido a presión, se puede determinar el trabajo de una extrusora.

Podemos considerar que en el extrusor mantenemos fijo el cilindro y el tornillo girando, o viceversa. El movimiento relativo es idéntico en ambos casos.

Resulta más fácil construir la primera opción, pero para obtener ecuaciones que describan matemáticamente el flujo del polímero, y evitar el movimiento del sistema de coordenadas, suponemos que lo que se mueve es el cilindro y las relaciones que así se obtienen, son válidas.

Para hacer el estudio del movimiento de material en el canal del tornillo se considera el movimiento de una superficie plana que se desliza sobre el material en cuestión; el movimiento relativo de la superficie respecto al canal, da lugar al arrastre del fluido; se considera el canal del tornillo de sección rectangular y moviéndose con relación a un plano que cubre su lado abierto, es decir el fondo del canal y el cilindro son dos planos paralelos.

Las direcciones positivas de los ejes x, y, z del sistema de coordenadas fijo, y eje auxiliar "l" vienen indicadas con flechas (fig. 2.23). El eje y es perpendicular al plano seccionado, "z", va dirigido en sentido longitudinal, y "x" es transversal al canal helicoidal; "l" va dirigido longitudinalmente al husillo. El ángulo de hélice  $\theta$  del canal helicoidal correspondiente al diámetro exterior del husillo es:

$$\theta = \arctg (t/\pi D) \quad (2.6)$$

Donde:

D: diámetro exterior

t: paso del husillo

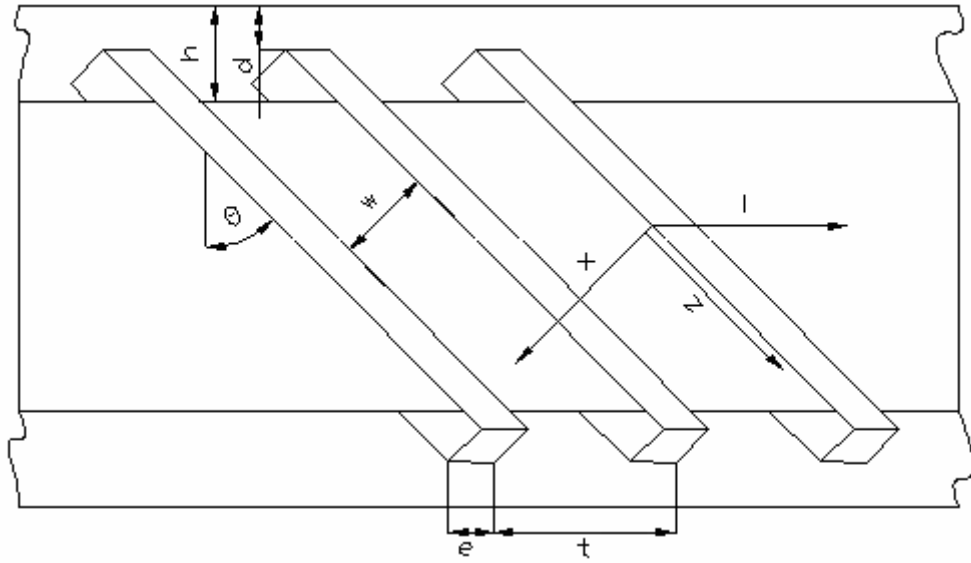


Fig. 2.23 Sección de un cilindro con husillo de un canal, vista general

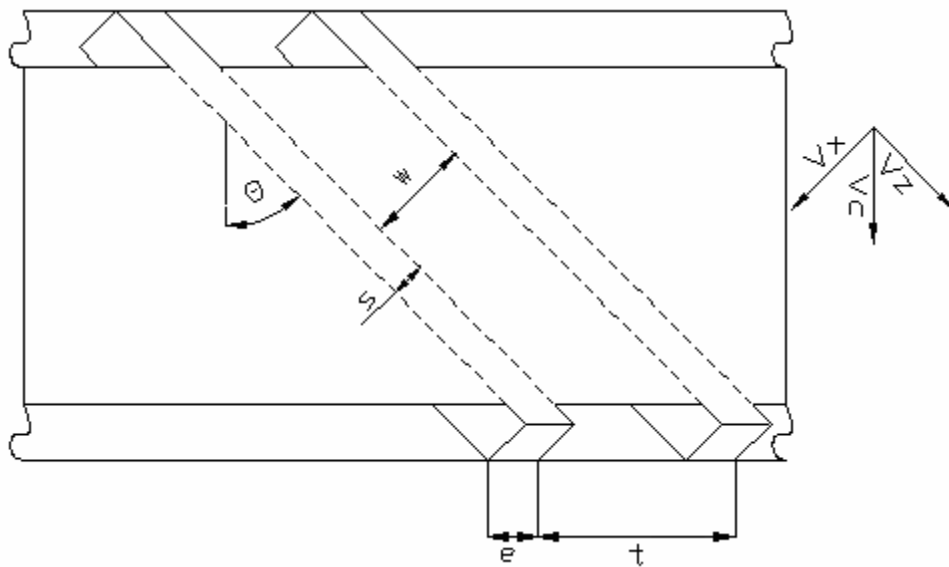


Fig. 2.24 Esquema del desarrollo

La velocidad circunferencial del cilindro  $V_c$ , se puede descomponer en dos componentes perpendiculares entre sí,  $V_z$  y  $V_x$  dirigidos longitudinal y transversalmente respecto al canal del husillo. La velocidad de la masa fundida en cualquier punto del canal se caracteriza por las componentes análogas  $V_z$  y  $V_x$ .

A continuación se realiza el análisis del flujo de fluido a través de la zona de bombeo; éste análisis, considera el flujo Newtoniano isotérmico para una corriente laminar estacionaria de un líquido isotrópico incompresible en un canal rectangular de ancho  $w$  y de altura  $h$ . Si suponemos que el flujo es uniforme y puede despreciarse la aceleración, la ecuación de movimiento de un flujo dirigido a lo largo del eje, en términos generales puede ser expuesta de la forma siguiente<sup>4</sup>:

$$\frac{dp}{dz} = \mu \left( \frac{d^2 V_z}{dx^2} + \frac{d^2 V_z}{dy^2} \right) + \frac{dV_z}{dx} \cdot \frac{d\mu}{dx} + \frac{dV_z}{dy} \cdot \frac{d\mu}{dy} \quad (2.7)$$

Donde:  $\frac{dp}{dz}$  es el gradiente de presión a lo largo del canal (kgf/cm<sup>2</sup>)

$V_z$  es la velocidad del fluido en el canal (cm/seg)

La viscosidad de la masa fundida varía muy poco a lo largo del eje en la sección transversal del canal, por considerar flujo isotérmico; con éste antecedente, la derivada parcial  $d\mu/dx = 0$ , con respecto a la profundidad del canal también varía muy poco y se puede admitir también que  $d\mu/dy = 0$ .

El efecto que pueden tener las paredes del canal helicoidal sobre la distribución de la velocidad es prácticamente nula, admitiendo así que  $dV_z/dx = 0$ . Con ésta serie de simplificaciones la ecuación (2.7) se la puede escribir así:

$$\frac{d^2 V_z}{dy^2} = \left( \frac{1}{\mu} \right) \frac{dp}{dz} \quad (2.8)$$

Tomando en cuenta las siguientes condiciones de borde: si  $y = 0$  (junto a la pared interna del cilindro),  $V_z = 0$ ; y, cuando,  $y = h$  (fondo del canal);  $V_z = V_z$ ; y luego de una doble integración, se obtiene la distribución de velocidades en cualquier punto del canal del husillo:

$$V = V_z y/h + (y^2 - hy)/2\mu (dp/dz) \quad (2.9)$$

---

<sup>4</sup> Fox Mac Donald, Mecánica de Fluidos, 2da edición, México, Editorial Mc Graw Hill, 1970, 342 p.



El primer término del segundo miembro de (2.9) varía linealmente con la profundidad del canal (fig. 2.15), que corresponde a la velocidad de flujo directo. El segundo término de éste miembro varía según una ley parabólica que representa la velocidad de flujo inverso (fig. 2.16).

### Caudal volumétrico

La expresión para calcular el caudal volumétrico de la extrusora se puede obtener partiendo de la ecuación (2.9), integrando el producto de la velocidad obtenida en un área elemental de superficie, dentro de los límites de toda la sección del canal:

$$Q = \int_0^h v \cdot w \cdot dy \quad (2.10)$$

Donde Q es el caudal volumétrico, expresado en cm<sup>3</sup>/seg. Reemplazando (2.9) en (2.10) e integrando se obtiene:

$$Q = V_z \cdot w \cdot \frac{h}{2} - w \cdot \frac{h^3}{12\mu} \cdot \left( \frac{dp}{dz} \right) \quad (2.11)$$

De la ecuación (2.11) se deduce que el flujo de retroceso se opone al flujo de fricción; al mismo tiempo que nos da el flujo del material a través de una boquilla en función de las dimensiones del tornillo. Prescindiendo de la curvatura del canal, este puede ser desarrollado en un plano:

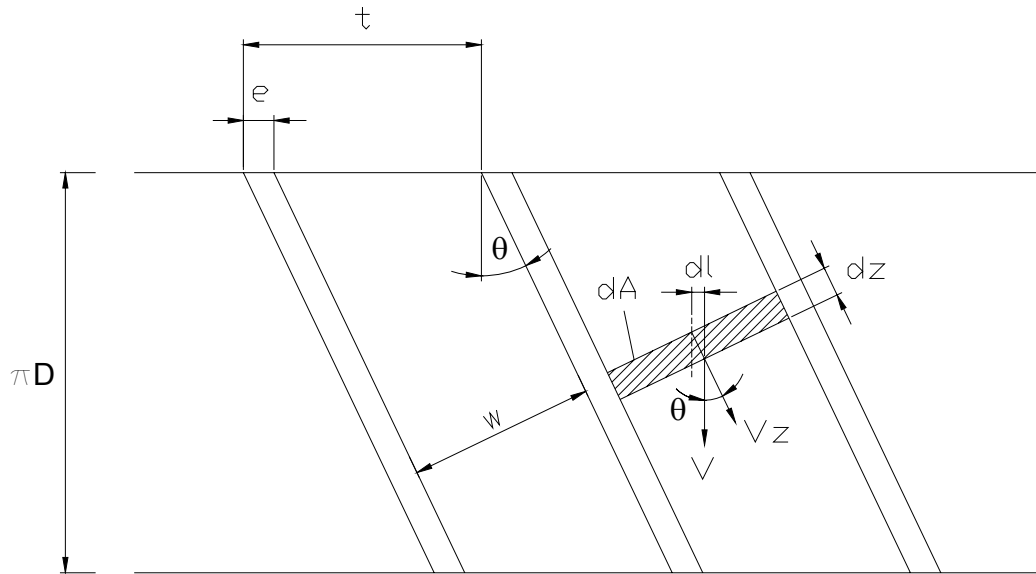


Fig. 2.25 Desarrollo del husillo

De la geometría del husillo podemos obtener las siguientes expresiones:

$$t = \pi \cdot D \cdot \operatorname{tg} \theta \quad \text{Paso de hélice (mm)} \quad (2.12)$$

$$w = \pi \cdot D \cdot \operatorname{sen} \theta \quad \text{Ancho del canal (mm)} \quad (2.13)$$

$$V_z = \pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \theta \quad \text{Componente de la velocidad (mm/seg) tangencial a lo largo del canal} \quad (2.14)$$

$$dz = dl / \operatorname{sen} \theta \quad \text{Diferencial de longitud del canal del tornillo} \quad (2.15)$$

Donde  $N$  es el número de revoluciones por segundo del tornillo y el producto  $\pi \cdot D \cdot N$  es la velocidad relativa de rotación del cilindro respecto al tornillo,  $dl$  es un diferencial de distancia en dirección del eje del tornillo.

Sustituyendo (2.13), (2.14) y (2.15) en (2.11) podemos expresar lo siguiente:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot h \cdot \text{sen} \theta \cdot \cos \theta - \left( \pi \cdot D \cdot h^3 \cdot \text{sen}^2 \theta / 12 \mu \right) \cdot (dp/dl) \quad (2.16)$$

Donde el primer término corresponde al flujo de fricción ( $Q_f$ ) y el segundo término corresponde al flujo de retroceso ( $Q_r$ ). Cuando las dimensiones del canal son invariables y la viscosidad constante, el gradiente de la presión a lo largo de éste será constante, entonces:

$$dp/dl = \Delta p / \Delta l = \Delta P / L \quad (2.17)$$

Donde  $L$  es la longitud de la rosca del tornillo en la zona dosificadora.

Otra forma de expresar la ecuación (2.16) es la siguiente:

$$Q = A \cdot N - B \cdot (\Delta P / \mu) \quad (2.18)$$

Donde:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot h \cdot \text{sen} \theta \cdot \cos \theta \quad (2.19)$$

$$B = \pi \cdot D \cdot h^3 \cdot \text{sen}^2 \theta / 12 L \quad (2.20)$$

El flujo de pérdidas, se origina por el flujo de polímero fundido a través del huelgo radial ( $\delta$ ), existente entre el vértice del filete del husillo y la superficie interna del cilindro. Estas fugas pueden ser estimadas como un flujo a presión que pasa a través de una rendija larga y estrecha dispuesta como se indica en la figura:

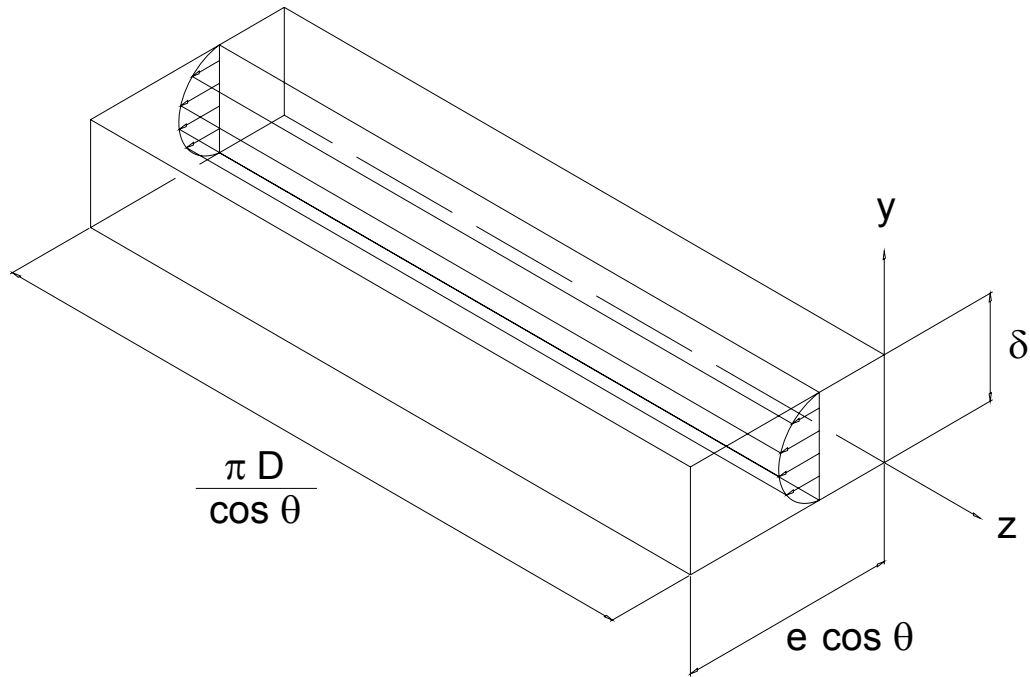


Fig. 2.26 Flujo de pérdidas

Si suponemos que el flujo es uniforme, la ecuación del movimiento del polímero a lo largo del eje X, en términos generales es<sup>5</sup>:

$$d^2v/dy^2 = (1/\mu) \cdot (dP/dx) \quad (2.21)$$

Tomando en cuenta las condiciones extremas del flujo, es decir, la velocidad nula en sentido X tanto en el cilindro como en la parte superior del husillo, esto es: cuando  $y = 0$ ,  $v = 0$  y, al ser  $y = \delta$  entonces  $v = 0$ .

Realizando una doble integración sobre (2.21), obtenemos la distribución de velocidades en la ranura, esto es:

$$v = (1/2\mu) \cdot (y^2 - \delta \cdot y) \cdot (dP/dx) \quad (2.22)$$

<sup>5</sup> Fox Mac Donald, Mecánica de Fluidos, 2da edición, México, Editorial Mc Graw Hill, 1970, 336 p.

Según la cual la velocidad del flujo de fugas varía según una ley parabólica.

Para calcular el caudal que fluye a través de la holgura, se integra el producto de la velocidad obtenida en un área elemental de superficie, dentro de los límites de toda la sección transversal de la rendija.

$$Q = \int_0^{\delta} v \cdot \pi \cdot D / \cos \theta \cdot dy \quad (2.23)$$

De la cual, se obtiene:

$$Q_p = \left( \pi \cdot D \cdot \delta^3 / 12 \mu \cos \theta \right) \cdot (dP/dx) \quad (2.24)$$

Como:

$$dP/dx = \Delta p / \Delta x = \Delta p / (e \cdot \cos \theta) \quad (2.25)$$

Donde:

$\Delta p$  : diferencia de presión en ambos lados del filete (kgf/cm<sup>2</sup>)

$e$  : ancho de la cresta del filete (cm)

Conjugando (2.24) y (2.25), resulta:

$$Q_p = \pi \cdot D \cdot \delta^3 \cdot \Delta p / (12 \mu \cdot e \cdot \cos^2 \theta) \quad (2.26)$$

Es conveniente, considerar un coeficiente de excentricidad para el husillo<sup>6</sup>, entonces el flujo real de pérdidas es:

---

<sup>6</sup> Savgorodny, V., Transformación de Plásticos, 2da edición, Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A., 1981; 7 p.

$$Q_p = \pi \cdot D \cdot \delta^3 \cdot E \cdot \Delta p / (12\mu \cdot e \cdot \cos^2 \theta) \quad (2.27)$$

El valor de  $\Delta p$ , se puede expresar de mejor manera mediante la diferencia total de presión a lo largo del husillo  $\Delta P$ , calculando primero la caída de presión  $\Delta p_p$  observada en el área correspondiente a un paso del canal helicoidal.

$$\Delta p_p = \Delta P / m \quad (2.28)$$

Donde  $m = L/t$ ,  $m$  es el número de espiras. Reemplazando  $m$  y (2.12) en (2.28) se obtiene:

$$\Delta p_p = \pi \cdot D \cdot \text{tg}\theta \cdot \Delta P / L \quad (2.29)$$

La diferencia de presión en ambos lados del filete será una fracción de la caída de presión observada en el área correspondiente a un paso del canal helicoidal. Esta fracción depende de la geometría del tornillo:

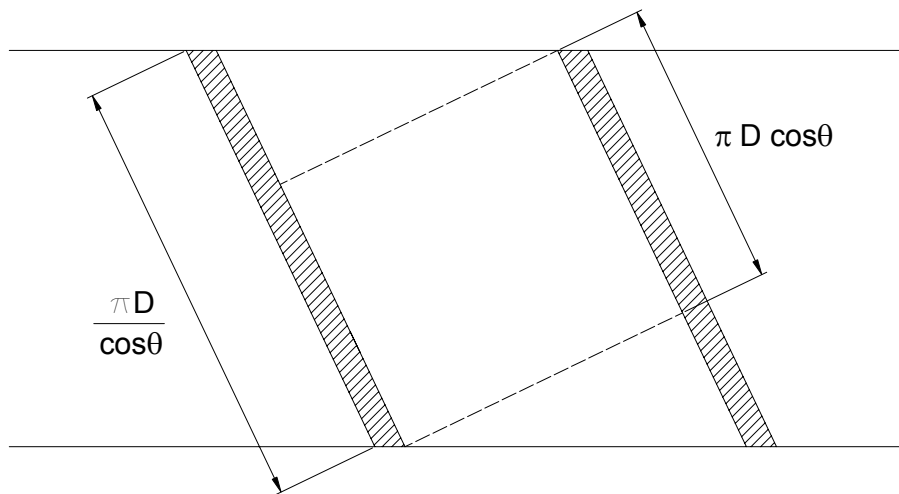


Fig. 2.27 Caída de presión en el husillo

$$\Delta p = \Delta p_p \cdot [(\pi \cdot D / \cos \theta) - \pi \cdot D \cdot \cos \theta] / (\pi \cdot D / \cos \theta)$$

$$\Delta p = \Delta p_p \cdot \text{sen}^2 \theta \quad (2.30)$$

Sustituyendo (2.29) en (2.30), se tiene:

$$\Delta p = \pi \cdot D \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{sen}^2 \theta \cdot \Delta P / L \quad (2.31)$$

Reemplazando (2.31) en (2.27), resulta:

$$Q_p = \pi^2 \cdot D^2 \cdot \delta^3 \cdot E \cdot \operatorname{tg}^3 \theta \cdot \Delta P / (12 \mu \cdot e \cdot L) = G \cdot (\Delta P / \mu) \quad (2.32)$$

Donde  $G = \pi^2 \cdot D^2 \cdot \delta^3 \cdot E \cdot \operatorname{tg}^3 \theta / (12 \cdot e \cdot L)$ ,  $G$  es una constante del flujo de pérdidas.

Añadiendo el flujo de pérdidas a la ecuación (2.18), se determina la ecuación del flujo total:

$$Q = A \cdot N - B \cdot (\Delta P / \mu) - G \cdot (\Delta P / \mu) \quad (2.33)$$

Existen husillos para ciertos usos particulares en los cuales, las dimensiones del canal helicoidal varían con la longitud. En estos, el ángulo de hélice y la profundidad del canal deberán expresarse como función de la longitud. Reemplazando  $\theta$  y  $h$  como una función de  $l$ , en la ecuación de flujo total se tiene:

$$Q = \alpha \cdot h_{(l)} \cdot \operatorname{sen} \theta_{(l)} \cdot \cos \theta_{(l)} - \left[ \beta / \mu \cdot h^3_{(l)} \cdot \operatorname{sen}^2 \theta_{(l)} + \epsilon / \mu \cdot \operatorname{tg}^3 \theta_{(l)} \right] \cdot (dP/dl) \quad (2.34)$$

Donde:

$$\alpha = 1/2 \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \quad (2.34a)$$

$$\beta = \pi \cdot D / 12 \quad (2.34b)$$

$$\epsilon = \pi^2 \cdot D^2 \cdot \delta^3 \cdot E / 12e \quad (2.34c)$$

En diversas aplicaciones se suele emplear husillos con una sola zona de compresión creciente, al comienzo de la cual se efectúa la compresión y al final la extrusión del material plastificado homogéneo<sup>7</sup>.

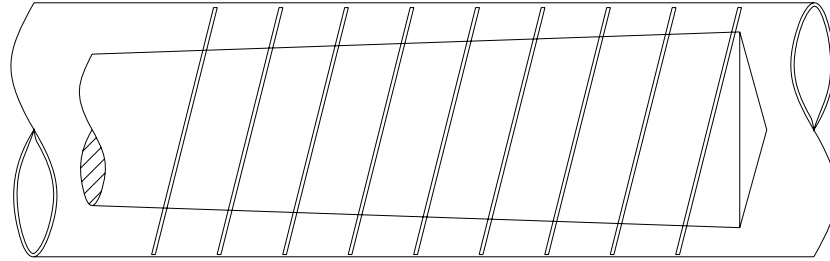


Fig. 2.28 Husillo con una zona de compresión creciente

El tornillo de la figura es de una sola etapa, con paso constante y profundidad de canal variable, por lo tanto la función  $\theta(l)$  es constante, y la función  $h(l)$  debe ser considerada.

Puesto que el flujo real  $Q$  es constante a lo largo del husillo, el incremento de presión en toda la longitud de la zona dosificadora del husillo ( $L$ ) se obtiene integrando la ecuación (2.34), entonces:

$$\Delta P = \int_0^L dP = \int_0^L \left( \frac{[\alpha \cdot h_{(l)} \cdot \text{sen} \theta \cdot \cos \theta - Q] \cdot \mu}{\beta \cdot h_{(l)}^3 \cdot \text{sen}^2 \theta + \epsilon \cdot \text{tg}^3 \theta} \right) \cdot dl \quad (2.35)$$

Como la holgura  $\delta$  está en el orden de las décimas de milímetro, el factor  $\delta$  hace que el valor de  $\epsilon$  sea despreciable frente al resto de valores. De esta manera (2.35) puede escribirse como:

<sup>7</sup> Savgorodny, V., Transformación de Plásticos, 2da edición, Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A., 1981; 19 p.



$$\Delta P = \int_0^L dP = \int_0^L \left( \frac{[\alpha \cdot h_{(l)} \cdot \text{sen} \theta \cdot \text{cos} \theta - Q] \cdot \mu}{\beta \cdot h^3_{(l)} \cdot \text{sen}^2 \theta} \right) \cdot dl \quad (2.36)$$

Despejando  $\Delta P$  de (2.5) y reemplazando en (2.36) resulta:

$$\frac{Q \cdot \mu}{K} = \int_0^L \left( \frac{[\alpha \cdot h_{(l)} \cdot \text{sen} \theta \cdot \text{cos} \theta - Q] \cdot \mu}{\beta \cdot h^3_{(l)} \cdot \text{sen}^2 \theta} \right) \cdot dl \quad (2.37)$$

Despejando Q de la última ecuación se tiene:

$$Q = \frac{\alpha \cdot \int_0^L \frac{\text{ctg} \theta}{h^2_{(l)}} \cdot dl}{\frac{\beta}{K} + \int_0^L \frac{\text{csc}^2 \theta}{h^3_{(l)}} \cdot dl} \quad (2.38)$$

### Constante total de la boquilla (K)

El objetivo de los cabezales es formar una sección determinada del polímero que se extruye. Consta de dos partes: el sitio donde la masa debe distribuirse uniformemente frente a la ranura perfiladora y la misma ranura de sección constante, lugar donde el material adquiere la forma deseada. Para evitar que se formen asperezas en el material extruido, debido al relajamiento de tensiones, la fundición debe acercarse suavemente a la ranura moldeadora.

El gradiente total de presión del cabezal de la extrusora ( $\Delta P$ ), se calcula sumando los gradientes de presión ( $\Delta P_i$ ) que se presentan cuando el flujo atraviesa secciones de diferente geometría, tales como ranuras, orificios, orificios anulares, etc. Por lo cual:

$$\Delta P = \sum \Delta P_i \quad (2.39)$$

Para calcular la constante total de la boquilla (k, coeficiente de forma geométrica) el cabezal se divide convenientemente en zonas sucesivas de diferente configuración, correspondiente a cada una de estas zonas, la constante k.

Despejando  $\Delta P$  de (2.5), se tiene que:

$$\Delta P = Qu / k \quad (2.40)$$

El gradiente de presión en cada una de las zonas del cabezal es:

$$\Delta P_i = Qu / k_i \quad (2.41)$$

Reemplazando (2.40) y (2.41) en (2.39), se obtiene:

$$Qu / k = \sum Qu / k_i \quad (2.42)$$

De donde:

$$1/k = \sum 1/k_i = 1/k_1 + 1/k_2 + \dots + 1/k_i \quad (2.43)$$

La constante total de la cabeza perfiladora se puede determinar como la suma de las resistencias experimentales en las diferentes secciones:

$$K = 1/(1/k_1 + 1/k_2 + \dots + 1/k_i) \quad (2.44)$$

Para el cálculo del  $k_i$  de cada zona, se considerará que el material fluye a través de secciones transversales sencillas del tipo orificio o ranura, reduciendo, siempre que sea posible cualquier otra geometría a uno de estos casos sencillos.

El valor de  $k$  para las formas geométricas sencillas de la sección del cabezal se halla por las fórmulas<sup>8</sup>:

Para una abertura redonda:

$$k = \pi R a^4 / 8 L a \text{ (mm}^3\text{)} \quad (2.45)$$

---

<sup>8</sup> Waganoff N. P., Transformación de los termoplásticos, 2da edición, Buenos Aires, Editorial Mitre, 1969, 58 p.

Para la rendija:

$$k = bhr^3/12 Lr \text{ (mm}^3\text{)} \quad (2.46)$$

Donde:

Ra: radio de la abertura (mm)

La: Largo de la abertura (mm)

Lr Largo de la rendija (mm)

hr: Luz de la rendija (mm)

b: ancho rendija (mm)

Para determinar el gradiente de presión que se origina por el paso del material a través de la cabeza perfiladora, es necesario conocer la viscosidad aparente ( $\mu_a$ ) a determinadas velocidades de cizalla ( $\gamma$ ).

En el canal del tornillo la velocidad media de cizalla se puede determinar con la siguiente relación:

$$\gamma = \pi D N / h(l) \quad (2.47)$$

El cálculo de la velocidad de cizalla, dado el rendimiento Q, puede ser determinado, utilizando las siguientes relaciones<sup>9</sup>:

Para la abertura redonda

$$\gamma = 4Q/\pi Ra^3 \text{ (seg}^{-1}\text{)} \quad (2.48)$$

Para la rendija:

$$\gamma = 6Q/hr^2 b \text{ (seg}^{-1}\text{)} \quad (2.49)$$

---

<sup>9</sup> Waganoff N. P., Transformación de los termoplásticos, 2da edición, Buenos Aires, Editorial Mitre, 1969, 58 p.

### **Potencia necesaria para el proceso de extrusión.**

Para calcular la potencia requerida por una extrusora de tornillo es preciso analizar primero la potencia desarrollada en un área del tornillo de longitud  $dz$  en dirección del eje  $z$ .

En éste análisis se supone que el polímero fundido se compacta como un líquido newtoniano, que el canal del tornillo tiene dimensiones constantes, y que se trabaja en régimen isotérmico. Además se considera que el cilindro se desliza sobre el tornillo (fig. 2.25), de manera idéntica a como fue considerado este movimiento anteriormente, en la determinación de las ecuaciones de flujo.

La potencia consumida en el área antes mencionada será:

$$dz1 = Vc \cdot dF1 \quad (2.50)$$

Donde:

$dz1$ : diferencial de potencia consumida a lo largo de la longitud del canal;

$Vc$ : velocidad relativa del cilindro;

$dF1$ : Fuerza necesaria para mantener el movimiento del material en la dirección de  $V$ .

La fuerza  $dF1$  es igual al producto del esfuerzo unitario de corte ( $T$ ) por el área elemental sobre la que actúa este esfuerzo. En éste caso, la resultante de la fuerza que actúa en el sentido del eje  $Z$  del canal helicoidal, según la (figura 2.25) es:

$$dFz = dF1 \cos\theta = T dA1 \quad (2.51)$$

$$T = \mu \gamma$$

$T$ : Esfuerzo cortante ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

$\mu$ : Constante de proporcionalidad llamada viscosidad ( $\text{kgf}\cdot\text{sg}/\text{cm}^2$ )

$\gamma$ : Velocidad de cizalla ( $\text{sg}^{-1}$ )

Conjugando (2.1), (2.50) y (2.51), resulta:

$$dZ1 = (Vc / \text{Cos}\theta) \mu \gamma dA1 \quad (2.52)$$

Donde:  $\gamma = dv/dy$

Sustituyendo los valores de  $dA1$  y de  $\gamma$ , se obtiene la expresión de  $dZ1$  en función de las dimensiones geométricas del tornillo y de las variables de operación.

El diferencial de área,  $dA1$ , tal como se ve en la figura 2.25 es:

$$dA1 = wdz = (\pi D \cdot \text{sen}\theta) dz \quad (2.53)$$

Diferenciando la expresión (2.9), la cual determina la velocidad del material fundido en cualquier punto del canal del tornillo, se deduce la ecuación común para el gradiente de velocidad a cualquier profundidad:

$$\left( \frac{dv}{dy} \right)_{y=h} = \frac{Vz}{h} + \frac{h}{2 \cdot \mu} \left( \frac{dP}{dz} \right) \quad (2.54)$$

Sustituyendo (2.53) y (2.54) en (2.52), resulta:

$$dZ1 = \frac{\pi \cdot D \cdot Vz \cdot \mu \cdot Vc \cdot \text{Sen}\theta}{h \cdot \text{Cos}\theta} dz + \frac{\pi \cdot D \cdot h \cdot Vc \cdot \text{Sen}\theta}{2 \cdot \text{Cos}\theta} dP \quad (2.55)$$

Para la simplificación de la última ecuación, al relacionar el flujo de material con la potencia, se expresa dicha potencia en función de la longitud del tornillo y de las velocidades  $Vc$  y  $Vz$ , según la siguiente expresión obtenida de la figura 2.25:

$$Vc = Vz / \text{Cos}\theta \quad (2.56)$$

Reemplazando (2.14), (2.15) y (2.56) en (2.55), la expresión de la potencia será:

$$dZ1 = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot N^2 \cdot \mu}{h} dl + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot h \cdot \text{Sen} \theta \cdot \text{Cos} \theta}{2 \cdot \text{cos}^2 \theta} dP \quad (2.57)$$

El segundo término de la ecuación (2.57), contiene todos los términos del flujo de fricción:

$$Qf = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N h \cdot \text{Sen} \theta \text{Cos} \theta \quad (2.58)$$

Que reemplazando en (2.57), se tiene:

$$dZ1 = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot N^2 \cdot \mu}{h} dl + \frac{Qf}{\text{Cos}^2 \theta} dP \quad (2.59)$$

Debido a que la profundidad del canal varía, el flujo de fricción puede expresarse en función de un caudal medio, el cual, puede calcularse mediante la expresión<sup>10</sup>:

$$Qfm = \frac{\int_0^L Qf(dl)}{L} \quad (2.60)$$

A la máquina se le debe entregar una potencia adicional de dZ2, la cual es disipada por fricción cuando el material pasa a través del huelgo radial ( $\delta$ ). La potencia total requerida vendrá expresada como:

$$dZ = dZ1 + dZ2 \quad (2.61)$$

De manera análoga a la determinación de dZ1 y prescindiendo del aumento de presión en ésta zona de holgura, se tiene:

---

<sup>10</sup> Savgorodny, V., Transformación de Plásticos, 2da edición, Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A., 1981; 15 p.

$$\left(\frac{dv}{dy}\right)_{y=d} = \frac{Vz}{\delta} \quad (2.62)$$

La potencia consumida en un área diferencial del filete del husillo ( $dA_2$ ) es:

$$dZ_2 = V dF_2 = ((V \mu) / (\cos \theta)) \cdot (dv/dy) \cdot dA_2 \quad (2.63)$$

Donde:

$dF_2$  es la fuerza necesaria para mantener el movimiento del material en la dirección de  $V$ .

El área diferencial  $dA_2$ , según la siguiente figura es:

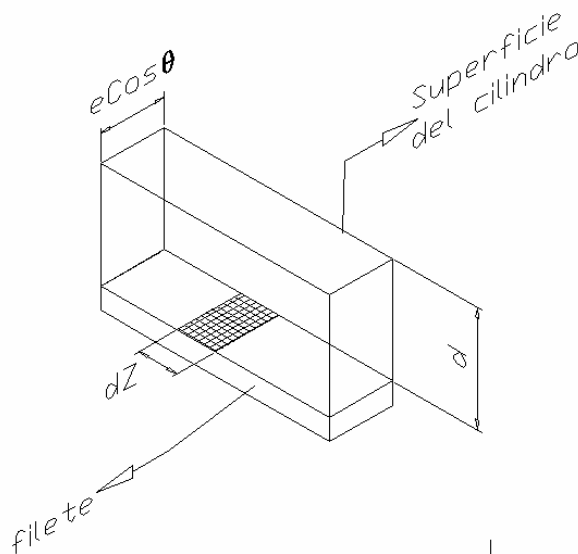


Fig. 2.29 Área diferencial  $dA_2$

$$dA_2 = e \operatorname{Ctg} \theta dl \quad (2.64)$$

Reemplazando (2.62) y (2.64) en (2.63) se obtiene:

$$dZ_2 = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2 \cdot \mu \cdot e}{d \cdot \tan \theta} dl \quad (2.65)$$

La viscosidad de la masa fundida varía a lo largo del husillo, por tal razón, las expresiones del caudal volumétrico y de la potencia, se pueden expresar en función de la viscosidad media. Esta viscosidad se la puede calcular mediante la expresión<sup>11</sup>:

$$\mu_m = \frac{\int_0^L \mu(dL)}{L} \quad (2.66)$$

Conjugando (2.59) y (2.65) en (2.61) se tiene:

$$dZ = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot N^2 \cdot \mu}{h} dl + \frac{Qf}{\cos^2 \theta} dP + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2 \cdot \mu \cdot e}{d \cdot \tan \theta} dl \quad (2.67)$$

Integrando la anterior ecuación a lo largo de la longitud L de la zona dosificadora del tornillo, recordando que h es función dl, debido a que es variable la profundidad del canal, reemplazando Qf por Qfm y  $\mu$  por  $\mu_m$ , la potencia necesaria para accionar el husillo resulta ser:

$$Z = \pi^3 \cdot D^3 \cdot N^2 \cdot \mu_m \int_0^L \frac{dl}{h(l)} + \frac{Qfm \cdot \Delta P}{\cos^2 \theta} + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2 \cdot \mu_m \cdot e \cdot L}{d \cdot \tan \theta} \quad (2.68)$$

En la ecuación (2.68), el primer término es proporcional al cuadrado de la velocidad de rotación del tornillo. El segundo término indica la potencia necesaria para mantener la presión en el tornillo. Si se coloca en la cabeza del extrusor una boquilla, o se adapta en la máquina un plato rompedor, aparece como consecuencia un gradiente de presión a lo largo del tornillo y aumenta el consumo de potencia necesaria.

El último término, es también, proporcional al cuadrado del número de revoluciones y expresa la potencia necesaria para cizallar el material en la holgura  $\delta$ . Este término, prácticamente resulta el más grande, por lo que una

---

<sup>11</sup> Savgorodny, V., Transformación de Plásticos, 2da edición, Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A., 1981; 15 p.



pequeña variación de  $d$  tiene por resultado, un aumento relativamente alto de potencia necesaria para la extrusión.

Sin embargo, este procedimiento para calcular la potencia necesaria para la extrusión arroja resultados poco fiables puesto que no considera los aspectos de calentamiento y fusión del polímero. La potencia provista por la acción rotatoria del tornillo calienta al polímero desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de extrusión, plastificándolo y bombeándolo a través de la boquilla. Los calefactores del cilindro usualmente proveen menos del 25% de la potencia requerida para incrementar la temperatura y plastificar al polímero; de forma general se establece que la fricción representa alrededor del 85% de la energía utilizada en el calentamiento del polímero, lo cual implica que el equipo de transmisión de potencia debe ser capaz de suministrar la energía necesaria para sobrellevar esta fricción. Una forma sencilla de calcular la potencia requerida para el proceso de extrusión en base a experiencias industriales es la siguiente:

$$P_o = \rho_m \cdot Q \cdot C_p \cdot (T_{OUT} - T_{IN}) + \rho_m \cdot Q \cdot H_f + \Delta P \cdot Q \quad (2.69)$$

Donde:

$P_o$  : Potencia

$\rho_m$  : Densidad del fundido

$C_p$  : Capacidad calorífica

$T$  : Temperatura

$Q$  : Flujo volumétrico del polímero fundido


$\Delta P$  : Cambio de presión

$H_f$  : Calor de fusión

Las máquinas extrusoras poseen una pobre eficiencia de bombeo, con el término de bombeo  $\Delta P \cdot Q$  contabilizado en alrededor del 10% de la potencia total suministrada por el motor. Con la ayuda de la ecuación (2.69) es fácil determinar que por cada Kg/h de capacidad de la máquina extrusora se necesitan alrededor de 0.3 KW de potencia suministrada.

## PROCEDIMIENTO PARA EL RECICLAJE MECÁNICO DE ENVASES PET

1. Recolección y clasificación de plásticos reciclables. La clasificación se refiere a una macroselección manual de componentes según lo especificado por la SPI (Sociedad de la Industria del Plástico).

Nombre	Unidad monomérica	Siglas	Símbolo de reciclado
Polietilenterftalato	Etilen glicol ( $C_2H_6O_2$ ) Ácido tereftálico ( $C_6H_4(COOH)_2$ )	PET (PETE)	




Fig. 2.30 Identificación del plástico PET según la SPI

- Si en los envases no se encontrara grabado el *símbolo de reciclado*, se puede utilizar luz ultravioleta para analizar la reacción a la luz de los diferentes plásticos, identificando al PET por su apariencia muy brillante frente a la luz ultravioleta.
2. Para evitar la presencia de contaminantes químicos en el PET, se aprovecharán únicamente las zonas transparentes de los envases, evitando la boquilla y la base de los mismos. Este paso comprende un proceso de corte para separar las zonas aprovechables de los envases.
  3. Proceso de molienda para producir las escamas de PET. Este proceso se realizará utilizando una *máquina de cuchillas cortadoras rotatorias*; este tipo de máquinas emplean un sistema de cuchillas rotatorias y fijas para producir el corte en el plástico. La capacidad de extrusión en el proceso será de 1 Kg/hr, lo cual implica que los elementos mecánicos tendrán dimensiones considerablemente pequeñas, por esta razón debe procurarse producir escamas del menor tamaño posible.

4. Lavado del plástico molido. Este proceso se realiza en dos etapas, una de lavado en caliente a 80 °C seguida de un lavado en frío. El lavado de agua caliente contiene 2% de NaOH y un detergente. Este proceso de dos pasos es recomendable puesto que es importante que no existan residuos de los agentes cáusticos como el NaOH que permanece en el PET lavado. Estos residuos alcalinos pueden catalizar la hidrólisis del PET lo que ocasiona una marcada reducción en la viscosidad intrínseca del polímero durante el reproceso.
  
5. Secado de las escamas de PET en estufas u hornos. El PET absorbe humedad del medio ambiente (semejante a un desecante). De este modo, durante el almacenaje, la resina de PET absorberá humedad hasta alcanzar el equilibrio. Dependiendo de las condiciones de almacenado, este valor puede ser tan alto como un 0,6% en peso pero, en la práctica, el polímero no absorbe niveles de humedad mayores a 0,2% en peso si se mantiene en un lugar cubierto y durante cortos periodos de tiempo. En el caso del PET, la humedad contenida no sólo se encuentra en la superficie sino también absorbida por el grano al introducirse en el interior de éste por difusión. Es por ello que el secado del PET difiere de otros procesos en los que sólo la humedad superficial tiene que ser eliminada. Debido a esta penetración de humedad, se requiere un tiempo relativamente largo de secado a temperaturas elevadas. Una de las condiciones necesarias para fabricar un buen producto de PET es reducir el contenido de humedad a menos de 0,004% (40 ppm) antes de procesar el material. El motivo es que, a temperaturas superiores al punto de fusión, el agua presente hidroliza rápidamente el polímero reduciendo el peso molecular y variando sus propiedades. La velocidad de hidrólisis del polímero aumenta con el incremento de la temperatura. Existe, sin embargo, un límite de temperatura máxima de secado sin causar una caída excesiva de viscosidad intrínseca. En la práctica las mejores condiciones de secado se alcanzan entre 165°C y 170°C de temperatura y tiempo de residencia entre 4 y 6 horas (el tiempo de secado teórico puede ser calculado dividiendo la capacidad del secador -Kg- entre la productividad de la máquina -kg/h-).

Una precaución adicional es evitar el contacto del Poliéster seco caliente con aire ambiental porque éste puede ganar humedad a una velocidad de 5 a 10 ppm por segundo.

- 6.** Reprocesado del plástico, proceso de extrusión. En este paso se utilizará la máquina extrusora de tornillo simple, la cual reprocesará las escamas secadas de PET colocadas previamente en la tolva de alimentación. Además, cuenta con dispositivos de regulación de temperatura y velocidad de giro del husillo; la variación de los parámetros de operación permitirá obtener un PET reciclado de buena calidad. La capacidad de esta máquina es de 1 Kg/hr.