

109 291



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

EXTRUSION DE PLASTICOS

Trabajo Monográfico de Actualización

Que para obtener el Título de

INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a

José Antonio Villaseñor Ortiz



MEXICO, D. F.

1991

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE DE TRABAJO.

1. Introducción.
2. Los plásticos.
 - 2.1 El desarrollo de los polímeros sintéticos.
 - 2.2 Clasificación.
 - 2.3 El desarrollo de la industria del plástico.
3. Extrusión de termoplásticos.
 - 3.1 Definición del proceso de extrusión.
 - 3.2 Historia.
4. La Reología en la extrusión de plásticos.
 - 4.1 Nota histórica.
 - 4.2 La ciencia de la Reología.
 - 4.3 Fluidos no-Newtonianos.
 - 4.3.1 Clasificación reológica.
 - 4.3.2 Efecto de la temperatura sobre la viscosidad.
 - 4.3.3 Efecto de la presión sobre la viscosidad.
 - 4.3.4 Comportamiento general no-Newtoniano de los polímeros fundidos.
 - 4.4 Reometría.
 - 4.4.1 Conceptos básicos de flujo.
 - 4.4.2 Viscosímetro capilar.
 - 4.4.3 Viscosímetro rotacional.
5. El extrusor de tornillo.
 - 5.1 Tolla de alimentación.
 - 5.2 Tornillo.

- 5.3 Barril.
- 5.4 Cabezal, plato rompedor y mallas.
- 5.5 La Boquilla y equipo de recolección.
 - 5.5.1 Extrusión de película por soplado.
 - 5.5.2 Extrusión de tubería rígida y flexible.
 - 5.5.3 Extrusión de láminas.
 - 5.5.4 Recubrimiento por extrusión.
 - 5.5.5 Recubrimiento de alambre.
 - 5.5.6 Extrusión de perfiles.
- 5.6 Variables de control en el proceso de extrusión.
- 6. El extrusor de doble tornillo.
- 7. La extrusión en la década de los noventas.
- 8. Discusiones.
- 9. Conclusiones
- 10. Bibliografía.

1. INTRODUCCION.

La producción de plásticos es actualmente la industria química de mayor crecimiento a nivel mundial; se puede afirmar con certeza que estamos en la era del plástico. En nuestro país se tiene una imagen errónea del plástico, considerándosele como un producto desechable, que se rompe, que no sirve, que es antiecológico y que genera basura. Podría decirse que en México no se ha desarrollado una cultura del plástico.

Como consecuencia, en México hacen falta verdaderos ingenieros y técnicos en plásticos que le den un impulso definitivo a esta industria, aprovechando además, la gran ventaja de tener en abundancia materia prima para fabricar estos productos que es el petróleo y gas natural.

Este trabajo pretende contribuir de alguna manera, al desarrollo de esta cultura del plástico, tan necesaria en nuestro país. Para ello se da al lector un panorama general de lo que son los plásticos, el desarrollo que han tenido y la situación actual de la industria del plástico a nivel mundial y nacional (capítulo 2); también se aborda de manera detallada en los capítulos 3, 5 y 6, la extrusión de termoplásticos, la técnica más importante y de mayor aplicación dentro del procesamiento de plásticos; el capítulo 4 trata de la Reología, la cual aporta los fundamentos matemáticos para abordar la extrusión.

Como en muchas otras áreas, los adelantos tecnológicos en el campo de la extrusión se han dado de una manera vertiginosa y

por demás asombrosa: en especial el uso de la computadora, ha permitido poder controlar toda una línea de proceso desde un escritorio por medio de un monitor digital; sin embargo, esto también ha llevado al rezago tecnológico a muchos países, incapaces de adquirir y mucho menos generar esta tecnología. El trabajo termina dando una perspectiva del proceso de extrusión en la década de los noventas (capítulo 7).

Comparto la opinión de Fernando Benites al afirmar que *el país que no tiene cuadros de primer orden científicos, tecnológicos y humanistas es un país condenado al atraso y a la dependencia.*

2. LOS PLÁSTICOS.

2.1 *El desarrollo de los polímeros sintéticos.*

Los plásticos son materiales poliméricos sintéticos, todos ellos compuestos orgánicos de alto peso molecular, cuya estructura puede ser representada mediante la repetición de pequeñas unidades llamadas monómeros.¹ El hecho de que sean materiales sintéticos, es decir, materiales hechos por el hombre, o al menos alterados por él, excluye del grupo de los polímeros sintéticos a otro tipo de plásticos como la madera, el algodón, la seda o el hule natural, a los cuales se les llama *polímeros naturales*.

No fue sino hasta mediados del siglo XIX, que el ser humano comenzó a modificar polímeros naturales para crear plásticos. La primera búsqueda deliberada de un plástico como un material que remplazara a uno natural, se atribuye a John Wesley Hyatt (1837-1920), quien en 1870, en un intento por ganar la recompensa ofrecida a quien obtuviese un substituto del marfil para las bolas de billar, introdujo un plástico conocido como *celuloide* (nitrocelulosa).

El primer plástico totalmente sintético, la *bakelita*, fue introducido por Leo Hendrik Baekeland (1863-1944), quien en 1900 la desarrolló desde sus bases químicas, fenol y formaldehído.

1. Podrían parecer contradictorias las palabras sintético y orgánico; habrá que recordar que la división general de la Química en Química Orgánica y Química Inorgánica resulta hoy en día muy ambigua, refiriéndose la primera a la química del carbono.

Este fué el comienzo del rápido y asombroso desarrollo de la ciencia de los plásticos.

En la siguiente tabla se enlistan los plásticos de mayor importancia comercial en la industria y sus fechas de desarrollo.

TABLA I DESARROLLO DE LOS POLIMEROS SINTETICOS.

1839	Vulcanización del hule (Charles Goodyear).
1851	Ebonita (Nelson Goodyear).
1870	Celuloide (nitrocelulosa, Hyatt).
1889	Películas fotográficas de nitrato de celulosa (Reichenbach).
1890	Fibras de rayón (Deisseis).
1903	Bakelita (feno)- formaldehido, Baekeland).
1912	Hojas de celulosa (celofan).
1919	Acetato de vinilo.
1927	Acetato de celulosa.
1928	Ureas.
1931	Acrílicos.
1936	Policloruro de vinilo (PVC).
1938	Nylon 66 (Carothers).
1938	Poliestireno.
1939	Melaminas.
1942	Poliétileno de baja densidad (LDPE).
1942	Poliéster.
1943	Silicones.
1943	Teflón (Plunkett).

- 1947 Resinas epoxis.
- 1948 Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS).
- 1953 Poliuretanos.
- 1957 Polipropileno.
- 1957 Polietileno de alta densidad lineal (LDHPE).
- 1958 Poliacetales.
- 1959 Policarbonato.
- 1964 Poliamidas.
- 1965 Polisulfonas.
- 1965 Polimetil penteno (TPX).
- 1969 Polibutileno tereftalato políester (PBT).
- 1973 Polibutileno.
- 1974 Poliamidas aromáticas. /5/ /13/

Hoy en día es muy grande el número de polímeros conocidos y muy diversas sus aplicaciones: los materiales poliméricos pueden compararse favorablemente con otros materiales estructurales clásicos y pueden ofrecer combinaciones de propiedades de gran calidad, junto con ventajas significativas en los métodos de procesamiento.

2.2 Clasificación.

Los plásticos se clasifican de manera general en termoplásticos y termorijos. De gran importancia son las propiedades de estos materiales como productos finales.

Los materiales termoplásticos, son aquellos cuya forma puede cambiarse repetidamente por calentamiento y deformación mecánica, sufriendo pocas alteraciones básicas en sus propiedades. Los polímeros termoplásticos contienen moléculas lineales y no presentan reticulación entre moléculas individuales; esto es una gran ventaja en procesos de moldeo tales como la extrusión o la inyección, en donde las sobras o material rechazado puede ser reciclado y moldeado de nuevo. Los principales tipos de termoplásticos incluyen: polietilenos, polipropilenos, polifluorocarbonos, cloruro de polivinilo (PVC), poliacrílicos, poliestirenos, poliacrilonitrilo butadieno estireno (ABS), y los plásticos de ingeniería como las poliamidas (nylon), policarbonatos, polisulfonas y poliacetales.

Los materiales termofijos poseen características diferentes. Debido a la reacción irreversible bajo la cual polimerizan, forman una masa rígida, dura e infusible. La estructura molecular cruzada con uniones químicas fuertes entre las cadenas poliméricas, hace que las cadenas moleculares de este material no puedan deslizarse entre sí. Los termofijos no pueden ser reprocesados, y un calentamiento excesivo produce la carbonización del mismo. Los principales tipos de termofijos incluyen: fenoles, poliésteres, epoxis, poliuretanos, silicones, y las amino resinas que incluyen a las ureas- formaldehidos y a las melamina- formaldehido.

2.3 El desarrollo de la industria del plástico.

La historia de la humanidad suele dividirse en eras definidas por los materiales empleados, así hablamos de una edad de piedra, edad de bronce o edad de hierro. Ahora podemos hablar de la era de los polímeros.

Quien no piense que el presente se llama ya era del plástico está viviendo con miopía empresarial su futuro.
/61/

Es evidente la importancia que tienen los plásticos en el desarrollo tecnológico y socioeconómico de nuestra época. Es bien sabido que los materiales sintéticos macromoleculares han excedido el volumen de la producción de acero pocas décadas después de su introducción en el mercado /20/, y sus usos y aplicaciones continuarán aumentando en el futuro.

Puede decirse que la simplicidad de fabricación, ha sido el factor más importante en el crecimiento de la industria del plástico. Después de que Charles Goodyear (1800-60), descubriera la vulcanización, William Parlez la plastificación y Baskeland los cargas reforzantes, sus materiales hubieran sido de poco valor sin la adaptación de métodos tecnológicos como el moldeo por compresión o la extrusión.

Desde sus inicios la producción de plásticos se convirtió en la industria química de mayor crecimiento a nivel mundial. La materia prima para su elaboración, petróleo y gas natural, es relativamente fácil de conseguir, a un bajo costo y en cantidades necesarias; además, con la misma materia prima se

pueden fabricar polímeros de muy diferentes estructuras y características.

En nuestro país, sólo entre el 2 y el 4 % del petróleo y gas natural que se extraen sirven de base para la producción de plásticos. La situación mundial del uso del petróleo y gas natural es aún más patética. La doctora Susana Chow Pangtay formula en *Petroquímica y Sociedad* /19/ una interrogante muy seria:

(Qué pensarían los seres humanos si se les propusiera talar todos los bosques del mundo para transformar sólo el 7 % de la madera en muebles y papel y el resto convertirlo en leña y carbón?

La cuestión es muy pertinente pues es lo que se está haciendo actualmente con el petróleo y el gas natural.

A sesenta años de haber surgido la industria del plástico como rama industrial en nuestro país, México es la cuarta plataforma petrolera a nivel mundial, número siete en petroquímica y número cuarenta en la industria del plástico. Esta industria está conformada por tres mil empresas transformadoras que dan trabajo a ciento cincuenta mil personas, la gran mayoría pertenecen a la pequeña y mediana industria, y el 95 % son de capital cien por ciento nacional. /62/

Los productos de plástico que se fabrican en México son de alta calidad, y por cada producto que se compra en el extranjero un mexicano se está quedando sin comer. Es necesario eliminar esa mala imagen que se tiene

de que solamente productos extranjeros son de elevada calidad. Es importante buscar la integración de las cadenas productivas, buscar una armonía entre los fabricantes de materias primas y transformadores, para que conjuntamente se pueda entregar un producto al consumidor que satisfaga sus necesidades, dado que se cuenta con la riqueza del petróleo. (63)

La producción de polímeros y objetos de plástico no está distribuida igualmente entre todos los países. En el mundo hay más de 180 países y solo diez producen el 90 % de todos los plásticos que se producen en el mundo.

TABLA 31. DISTRIBUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PLÁSTICOS.

	2
EUW	34.5
Alemania Occidental	14.6
Japón	13.6
URSS	7.2
Francia	6.2
Italia	5.8
Reino Unido	5.7
España	2.3
Canadá	1.8
Resto del mundo	8.3 /20/

La amenaza que representa el que en el futuro se agotarán las materias primas, ha frenado el impulso de la industria del plástico en muchos países. Por lo que toca a México, sus reservas probadas de hidrocarburos son tales, que podremos llegar hasta el primer cuarto del siglo XXI sin que problemas de esa índole afecten a la petroquímica. Sin embargo, si se continúa con un incremento en el consumo interno de petróleo y gas natural, es muy probable que para fines de este siglo haya problemas en su abastecimiento y se tengan que establecer áreas prioritarias en el consumo de ambos.

Unida entonces a la gran pregunta sobre el agotamiento de los hidrocarburos, está la cuestión del destino de la industria de los plásticos. Lo razonable no parece ser suprimir el desarrollo de esta industria, sino encontrar la materia prima adecuada para sustituir al petróleo como combustible y continuar su empleo en la fabricación de plásticos.

3. EXTRUSION DE TERMOPLASTICOS.

3.1 *Definición del proceso de extrusión.*

La palabra *extrusión* viene de los vocablos latinos *ex* que significa *fuera*, y *trudere* que significa *empujar*. Se puede definir la *extrusión* como el proceso de obtención de longitudes ilimitadas con una sección transversal constante, conformando el material al obligarlo a pasar a través de una boquilla, bajo condiciones controladas. Por medio de este proceso, materiales termoplásticos, usualmente en forma de gránulos, son conformados continuamente en tubos, varilla, hojas, recubrimiento para papel y alambre, películas y en millones de formas de contornos. La principal ventaja de la *extrusión*, es la posibilidad de obtener longitudes ilimitadas del material en forma continua, ya que cualquiera de los productos anteriores podrían ser hechos por medio de otra técnica, pero sólo en longitudes relativamente cortas.

Aproximadamente el 50 % de los plásticos son convertidos a productos por medio de la *extrusión*, y prácticamente casi todos ellos son extruidos en algún momento dentro de la línea de producción, desde que se obtienen en la planta química de polimerización, hasta que experimentan el proceso de transformación en artículos de consumo.

En la figura 1 tenemos un diagrama de proceso hipotético para hacer películas, en donde se aprecia que el corazón del proceso es el extrusor.

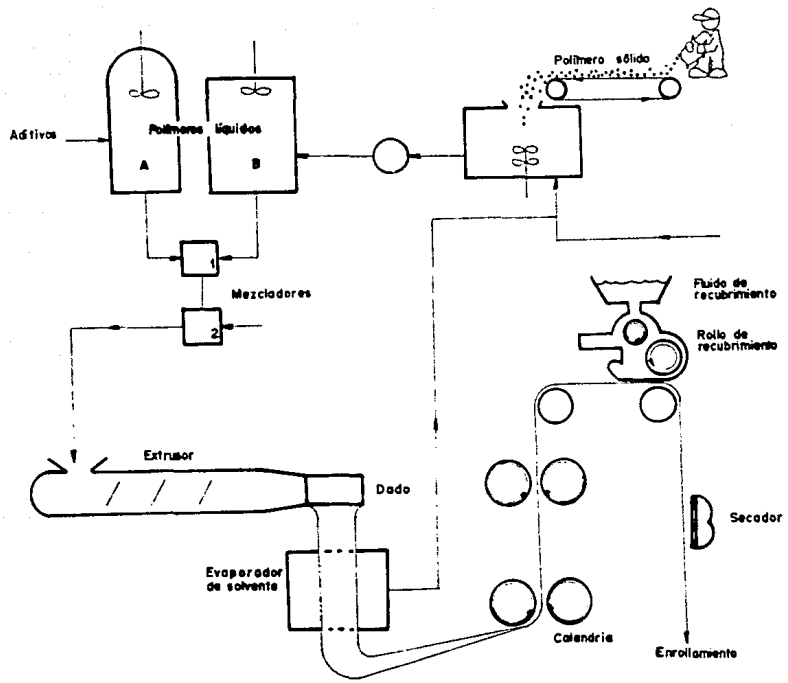


Fig.1 Diagrama de flujo para producción de película

Como ya se mencionó, la máquina que realiza el proceso de extrusión se llama extrusor. Un extrusor es una bomba, una máquina muy versátil capaz de desarrollar otras funciones concernientes con la de bombeo. En cualquier caso el objetivo del extrusor es producir un fundido homogéneo a una velocidad de flujo, presión y temperaturas apropiadas para la siguiente operación en la línea de proceso. La siguiente etapa es, por lo general, la formación de un artículo polimérico sólido.

Las posibilidades que ofrece un extrusor para calentar, plastificar y transportar el material plástico fundido y caliente, han situado a esta máquina en una posición clave y de creciente importancia en el campo del procesamiento de materiales plásticos.

Considerando el proceso global de extrusión, puede afirmarse que el equipo auxiliar de enfriamiento y recolección del extruido, se lleva el 50 % de la importancia para la obtención de artículos de buena calidad, otro 25 % de importancia puede atribuirse a la máquina de extrusión y el 25 % restante a las adecuadas propiedades del polímero utilizado para la aplicación final a que se destina.

La máquina de extrusión más utilizada es el extrusor de tornillo; empleando extrusoras de tornillo se han conseguido avances muy importantes en la técnica de extrusión. El avance más importante, sin embargo, ha sido la aplicación de la teoría del flujo de fluidos viscosos para obtener un conocimiento científico de lo que ocurre en el interior del cilindro y en la boquilla de una máquina de extrusión.

3.2 Historia.

El proceso de extrusión en aplicaciones tales como extrusión de productos cerámicos, pastas alimenticias, barras de hielo, electrodos de carbono, minas de grafito para lápices, vidrio y otros materiales, es un arte muy antiguo, cuyos comienzos no son muy conocidos.

La primera máquina industrial de extrusión que se recuerda parece ser la construida por J. Bramah en 1795 para la extrusión de tubería de plomo. El siguiente paso importante en este sector se produjo a mediados del siglo XIX cuando en Alemania e Inglaterra se comenzaron a recubrir conductores de cobre con gutapercha² para la fabricación de cables submarinos. La industria del cable ha sido así pionera y parte importante en el desarrollo de los procesos de extrusión.

De modo muy resumido podemos señalar las siguientes fechas que marcan momentos importantes en el desarrollo del actual proceso de extrusión de plásticos.

2. Goma traslúcida, sólida, flexible e insoluble en agua, que se obtiene haciendo incisiones en el tronco de algunos árboles de la India. Se parece mucho al caucho. Es mal conductor del calor y de la electricidad. Lo que le hace un aislador por excelencia.

TABLA III HISTORIA DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN.

- 1797 Joseph Bramah construye el primer extrusor de pistón, accionado manualmente para fabricar tubería de plomo. Esta máquina fue posteriormente modificada para extruir pastas alimenticias (macarrones).
- 1845 Bewlay y Broome obtienen la primera patente de extrusora para la transformación de plásticos.
- 1879 Gray patenta su extrusor de tornillo para recubrimiento de cables con gutapercha. El extrusor se calentaba con agua y la boquilla de extrusión se calentaba con una flama de gas.
- 1914 Se comienza la extrusión de plásticos de caseína para obtener artículos semielaborados, el extrusor utilizado tenía un tornillo de paso decreciente, plato rompedor y un cilindro con varias zonas de enfriamiento y calentamiento para controlar su temperatura.
- 1925 Troester introduce la calefacción eléctrica y con vapor en sus extrusores.
- 1937- 1939 Shaw y Troester introducen el uso de soplantes de aire para el enfriamiento del extrusor y la calefacción totalmente eléctrica, con longitudes de cilindro de 15 veces su diámetro.
- 1935 I.G. Faberindustrie construye una máquina de doble tornillo para la extrusión de materiales cerámicos y elastómeros.
- 1939 Colombo y Pasquetti construyen en Italia máquinas de doble tornillo para la extrusión de termoplásticos.
- 1945- 1955 Se hacen las primeras experiencias en laboratorio y se estudian y analizan todos los tipos de extrusores conocidos, así como el comportamiento de los materiales plásticos durante la extrusión.
- /8/

El primer libro publicado sobre extrusión fué el de H.R. Simonds. *Extrusion of Plastics. Rubber and Metals.* en 1952. El primer trabajo teórico interesante y profundo sobre extrusión se publicó en 1953 por un grupo de científicos de Dupont. /57/

Desde entonces el desarrollo de la teoría y la práctica de la extrusión ha sido sin duda el más importante de todos los espectaculares avances conseguidos por la industria transformadora de plásticos.

4. LA REOLOGIA EN LA EXTRUSION DE PLASTICOS.

4.1 Nota histórica.

La ley de Hooke (1676) es probablemente la primera ley reológica conocida, y establece que la deformación es proporcional a la fuerza aplicada. Newton (1686) consideró el comportamiento de un fluido estableciendo que la resistencia al movimiento era proporcional a la rapidez de corte (ley de Newton de la viscosidad). Posteriores derivaciones de estas simples consideraciones condujeron al término de fluidos *no Newtonianos*; estos últimos son la esencia de este capítulo.

No fué sino hasta 200 años después que Poiseuille en 1847 (a pesar de que inicialmente trabajó con sangre a través de tubos capilares, la cual sabemos hoy en día es un fluido no Newtoniano) derivó exitosamente a partir de sus experimentos la relación entre la presión y la velocidad de flujo volumétrico para un fluido Newtoniano. Barus (1893) también usó un tubo capilar a través del cual extruyó goma, la observación más importante en este trabajo fué que la goma presentó un *tiempo de retardo* en la recuperación parcial de su forma original tras la deformación. Hasta donde se sabe, ésta es la primera observación directa registrada del comportamiento no Newtoniano.

En los años veintes y treintas de nuestro siglo, se supo que existen muchas variaciones en el comportamiento no Newtoniano. Esto dió la pauta para la formación de la ciencia de

la Reología. Su nacimiento se asocia con nombres como Bingham, Weissenberg, Reiner, Scott- Blair y otros.

4.2 La ciencia de la Reología.

La ciencia relacionada con el estudio de la deformación y el flujo de la materia fue llamada *Reología* por Bingham, a quien se le ha llamado el Padre de la Reología moderna. El prefijo *reo* se deriva del término griego *rheos*, que significa corriente o flujo. La Reología ha llegado a incluir todos los aspectos de la deformación de la materia bajo la influencia de un esfuerzo impuesto: *es el estudio de las respuestas internas de los materiales a las fuerzas.*

El estudio de la Reología incluye dos diferentes ramas de la mecánica: la mecánica de fluidos y la mecánica de sólidos. La fisicoquímica de los polímeros trata de los materiales viscoelásticos, los cuales se comportan como fluidos (propiedades viscosas) y como sólidos (propiedades elásticas).

El componente elástico es dominante en los sólidos, por lo que sus propiedades mecánicas se describen por medio de la *ley de Hooke* (ecuación 1), la cual establece que la deformación resultante y es proporcional al esfuerzo aplicado S . El esfuerzo es igual a la fuerza por unidad de área, y la deformación o elongación es la extensión por unidad de longitud.

$$S = E y \quad (1)$$

El componente viscoso es dominante en los líquidos, y sus propiedades viscosas se describen por medio de la ley de Newton de la viscosidad (ecuación 2), la cual establece que el esfuerzo cortante aplicado τ es proporcional a la rapidez de deformación o rapidez de corte $\dot{\gamma}$. La constante de proporcionalidad η se llama viscosidad del fluido.

$$\tau_{yx} = -\eta \frac{d\gamma}{dt} = -\eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

El fluido más simple de este tipo es el Newtoniano, el cual presenta una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la rapidez de corte. Esto quiere decir que una gráfica del esfuerzo cortante contra la rapidez de corte nos dará una recta con centro en el origen y cuya pendiente es la viscosidad del fluido. La mayoría de los fundidos poliméricos se comportan como fluidos Newtonianos en rangos de rapidez de corte altos y bajos; sin embargo, el rango práctico en el procesamiento de plásticos cae dentro del comportamiento no-Newtoniano. En la figura 2 se representa el comportamiento general Newtoniano. El esfuerzo cortante también deberá ser interpretado como el flujo de momento; esta interpretación se apega mejor a la naturaleza molecular del proceso de transporte de momento y corresponde al tratamiento dado para el transporte de energía y de masa.

La reología es de extrema importancia en el procesamiento de plásticos; en casi todos los casos, está involucrado el flujo del material dentro de la fabricación de un objeto útil. El proceso de extrusión es un ejemplo típico.

El comportamiento reológico influye en el comportamiento mecánico del producto terminado; por ejemplo, la orientación molecular tiene efectos dramáticos en las propiedades mecánicas de objetos moldeados, películas y fibras. El tipo y grado de orientación está determinado por el comportamiento reológico del polímero y por la naturaleza del flujo en el proceso de fabricación.

4.3 Fluidos no Newtonianos.

Los fluidos *no-Newtonianos* presentan una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la rapidez de corte, y es precisamente este efecto el más importante en la teoría de la extrusión y flujo de polímeros fundidos en conductos largos. La mayoría de las disoluciones y fundidos de polímeros sintéticos presentan en menor o mayor grado este comportamiento.

Imaginemos un tubo horizontal de longitud L y radio R en donde la velocidad de flujo volumétrico (Q) es medida en función del gradiente de presión axial (P). Para un fluido Newtoniano bajo condiciones isotérmicas esta relación es lineal y sigue la ecuación de *Hagen-Poiseuille*:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

en donde R es el radio del tubo y L su longitud (gráfica 1).

Ya que la relación lineal entre la velocidad de flujo volumétrico y el gradiente de presión en la ecuación Newtoniana

(3) se origina de la relación lineal entre esfuerzo cortante y rapidez de corte en la ecuación de viscosidad de Newton, es razonable pensar que la relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la rapidez de corte explicará el comportamiento no-Newtoniano.

Una aproximación para construir un modelo no Newtoniano es la generalización del modelo Newtoniano. El modelo de flujo más común para lograr esto es el llamado *ley de potencia* o *modelo de Ostwald y de Valle*.

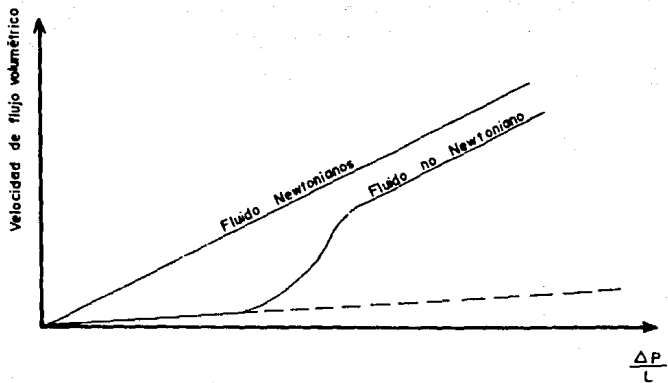
$$\tau_{yx} = K \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

n es el exponente de la ley de potencia y es igual a uno para el caso Newtoniano, es menor a uno para el caso pseudoplástico y es mayor a uno para el caso dilatante (gráfica 2). K es la constante de proporcionalidad de la ley de potencia y es igual a la viscosidad del fluido para el caso Newtoniano. K depende de la rapidez de corte o del esfuerzo cortante, así como de la temperatura y de la presión.

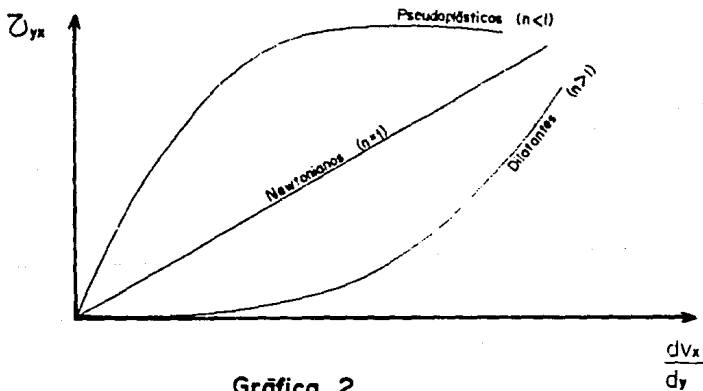
4.3.1 Clasificación reológica de los fluidos no-Newtonianos.

FLUIDOS DE BINGHAM. Los fluidos de Bingham no fluyen hasta que se aplica un valor de fuerza mínimo llamado *punto de cedencia* (p.c.): una vez que se excede este valor ocurre el flujo. El

3. En la rotación τ_{yx} "y" nos indica la dirección del flujo de momento, y "x" la dirección del flujo global.



Gráfica 1 .



Gráfica 2.

punto de cadencia es una consecuencia de la fuerza de los enlaces moleculares; una vez que estas uniones se han roto, el material fluye más fácilmente. La relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de corte es lineal una vez que el flujo comienza (figura 3).

FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS. Una disolución diluida de un polímero en un solvente se aproxima al comportamiento Newtoniano. Una disolución altamente concentrada del mismo polímero en el mismo solvente se comporta como un fluido de Bingham; entre estos dos extremos, la solución no presenta un punto de cadencia y sigue el comportamiento pseudoplástico. Este tipo de fluidos se caracterizan por un decremento en la viscosidad con el aumento en la rapidez de corte (figura 4).

FLUIDOS DILATANTES. Este comportamiento es menos frecuente que el pseudoplástico, sin embargo las disoluciones y dispersiones de polímeros (pintura, recubrimientos, adhesivos) exhiben este fenómeno ocasionalmente. En este caso la viscosidad aumenta con el aumento en la rapidez de corte (figura 5).

FLUIDOS TIXOTROPICOS Y REOPÉCTICOS. Los fluidos tixotrópicos son aquellos cuya viscosidad decrece con el tiempo. En este caso la estructura del fluido se rompe bajo el aumento en la duración del corte. Al terminar el esfuerzo cortante, la estructura se rehace a la misma velocidad que el proceso de ruptura (figura 6). Los fluidos que presentan el comportamiento opuesto se les llama reopécticos: en este caso la viscosidad aumenta con el tiempo.

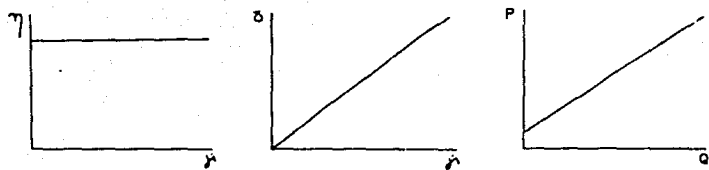


Fig. 2 Comportamiento Fluidos Newtonianos

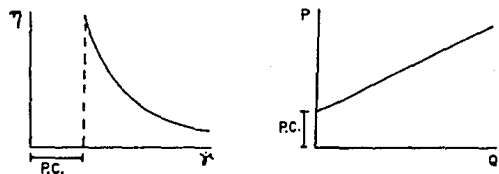


Fig. 3 Fluidos de Bingham

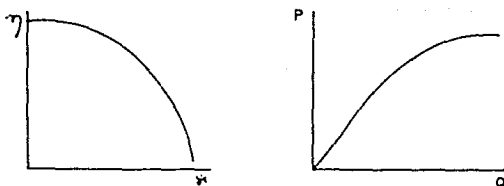


Fig. 4 Fluidos pseudoplásticos

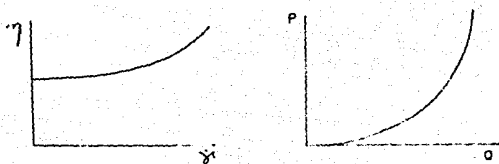


Fig. 5 Fluidos Dilatantes

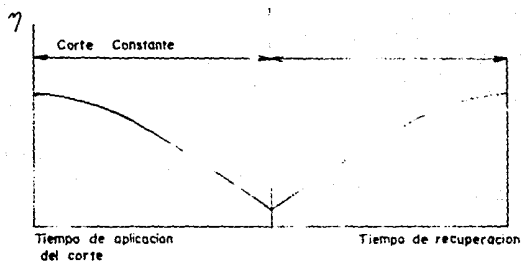


Fig. 6 Fluidos Tixotrópicos

4.3.2 Efecto de la temperatura sobre la viscosidad.

Para la mayoría de los polímeros fundidos, la viscosidad varía en gran medida con cualquier cambio en la temperatura. Para fluidos Newtonianos, la variación de la viscosidad con la temperatura sigue la ecuación de Arrhenius:

$$\eta = k e^{E/RT} \quad (5)$$

en donde K , es una constante característica del polímero y su peso molecular a una temperatura dada. E es la energía de activación del proceso. R es la constante de los gases y T es la temperatura en grados Kelvin. E generalmente se encuentra en el rango de 5 000 a 50 000 calorías por mol.

Para los fluidos no-Newtonianos, una manera de calcular la viscosidad en función de la temperatura es por medio del *Polinomio de Muensted*.

$$\begin{aligned} \text{Log } \eta = & A_0 + A_1 \text{Log } \dot{\gamma} + A_2 (\text{Log } \dot{\gamma})^2 \\ & + A_3 (\text{Log } \dot{\gamma})^3 + A_4 (\text{Log } \dot{\gamma})^4 \end{aligned} \quad (6)$$

en donde A_0, \dots, A_4 son constantes características de cada polímero, $\dot{\gamma}$ es la rapidez de corte y η la viscosidad.

Para introducir la corrección por temperatura se calcula el factor de corrección aT por medio de la ecuación de William-Landel-Ferry o ecuación W-L-F.

$$\text{Log } aT = \frac{-C_1 (T-T_0)}{C_2 + T-T_0} \quad (7)$$

en donde C_1 y C_2 son constantes características del polímero, T es la temperatura del fundido en grados centígrados y T_0 es la temperatura de referencia.

Introduciendo el factor de corrección aT al polinomio de Muensted tenemos:

$$\text{Log } \eta = \text{Log } aT + A_0 + A_1 (\text{Log } aT \dot{\gamma}) + A_2 (\text{Log } aT \dot{\gamma})^2 + A_3 (\text{Log } aT \dot{\gamma})^3 + A_4 (\text{Log } aT \dot{\gamma})^4 \quad (8)$$

4.3.3 Efecto de la presión sobre la viscosidad.

Existen varias teorías que sugieren que la viscosidad de un fluido está determinada por su volumen libre. El volumen libre de un líquido está definido como la diferencia entre el volumen actual del líquido y un volumen en el cual, debido al acomodamiento tan cercano de las moléculas no es posible ningún movimiento. Entre mayor sea el volumen libre es más fácil que se presente el flujo. El volumen libre aumenta con la temperatura debido a la expansión térmica; sin embargo la influencia más directa sobre el volumen libre es la presión. Un aumento en la

presión hidrostática disminuye el volumen libre y aumenta la viscosidad del líquido.

En un extrusor, la presión de operación es muy elevada. El aumento de la viscosidad debido a la presión existe, pero se anula debido al calentamiento del equipo y al calor generado por esfuerzo cortante. /4/

4.3.4 Comportamiento general no-Newtoniano en fluidos poliméricos.

Una característica de los polímeros fundidos es su comportamiento no-Newtoniano, por lo cual la viscosidad disminuye con el aumento en la rapidez de corte. Este comportamiento es de gran importancia práctica en el procesamiento y fabricación de plásticos. La disminución de la viscosidad facilita el procesamiento del polímero fundido; al mismo tiempo, la energía requerida para operar un extrusor se reduce. Es por esto que en el procesamiento de plásticos y en concreto en el proceso de extrusión, los fluidos dilatantes son poco deseables, y se trabaja con fluidos pseudoplásticos.

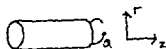
4.4 Reometría.

Existe una gran variedad de instrumentos para medir la viscosidad y otras propiedades reológicas de líquidos y polímeros fundidos. Para poder generar estos datos, el instrumento debe ser capaz de agitar al fluido a una determinada

velocidad, y debe proporcionar un valor de esfuerzo cortante asociado con uno de rapidez de corte.

4.4.1 Conceptos básicos de flujo.

La teoría de la extrusión en (como de la geometría se basa en los fenómenos de transporte. A continuación se presentan las ecuaciones para representar el flujo a través de un ducto circular.



Ecuación de continuidad en coordenadas cilíndricas

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad \dots 1$$

r es el radio del cilindro

V_r es el componente de la velocidad en la dirección r

V_α es el componente de la velocidad en la dirección α

V_z es el componente de la velocidad en la dirección z

α es la dirección rotacional indicada en el esquema

z es la longitud axial del cilindro.

Ecuación de movimiento en coordenadas cilíndricas.

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\alpha}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \alpha} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\alpha z}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho G_z \quad \dots$$

G es la constante de gravedad.

ρ es la densidad del fluido

t es el tiempo

De la ecuación 1 y considerando:

Régimen estacionario ($\rho = \text{cte}$)

$$V_r = 0$$

$$V_\theta = 0$$

Tenemos
$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho V_z) = 0$$

De la ecuación 2 y considerando un tubo horizontal

$$Gz\rho = \text{cte}$$

$$\bar{v}_{az} = 0$$

$$\bar{v}_{zz} = 0$$

Tenemos

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial(r\bar{v}_{rz})}{\partial r}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\bar{v}_{rz}) = -\frac{\partial P}{\partial z}$$

Integrando

$$r\bar{\tau}_{rz} = -\frac{\Delta P}{\Delta z} \frac{r^2}{2} + C_1$$

$$\bar{\tau}_{rz} = -\frac{\Delta P}{\Delta z} \frac{r}{2} + \frac{C_1}{r}$$

Tomando valores a la frontera

$$\text{en } r=0, \bar{\tau}_{rz}=0 \quad \therefore C_1=0$$

$$\Delta z = L$$

entonces

$$\bar{\tau}_{rz} = -\frac{\Delta P}{L} \frac{r}{2} \quad \text{distribución del flujo de momento} \quad \dots \rightarrow$$

Introduciendo a la ley de Newton

$$\bar{\tau}_{rz} = -\eta \frac{dv_z}{dr}$$

Sustituyendo en \rightarrow

$$\frac{dv_z}{dr} = -\frac{\Delta P}{L} \frac{r}{2\eta} = \gamma \quad \dots 4$$

Integrando

$$V_z = - \frac{\Delta P}{L} \frac{r^2}{4\eta} + C_2$$

Tomando valores a la frontera

$$\text{en } r=R, V_z=0 \text{ y } C_2 = \left(\frac{\Delta P}{L} \frac{R^2}{4\eta} \right)$$

en donde

R = radio del tubo

por lo que la distribución de velocidad dentro del tubo es:

$$V_z = \frac{\Delta P}{L} \frac{R^2}{4\eta} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

por otro lado

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad \text{Ec. de Hagen}$$

Combinando con la ecuación 4 podemos calcular la velocidad de corte como:

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

4.4.2 Viscosímetro capilar.

El viscosímetro capilar es un instrumento muy popular para estudiar el comportamiento reológico de los polímeros fundidos. Como se muestra en la figura 7, el polímero líquido es forzado desde un recipiente a través de un capilar, por medio de un pistón o por presión. La presión ejercida es una medida del esfuerzo cortante, y la cantidad de material extruido por unidad de tiempo es una medida de la rapidez de corte.

El viscosímetro capilar tiene la ventaja de ser relativamente fácil su llenado. la temperatura y la rapidez de corte de prueba pueden ser variados fácilmente; además la velocidad de corte y la geometría de flujo son similares a las condiciones reales en un extrusor. Las principales desventajas de este tipo de instrumento es que la rapidez de corte no es constante y varía a través del capilar, y además es necesario hacer correcciones para obtener valores de viscosidad precisos.

De acuerdo con la teoría desarrollada, las ecuaciones principales para flujo Newtoniano para el viscosímetro capilar son:

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8Q} \frac{\Delta P}{L} \quad \text{Ec de Hagen-Poiseville}$$

$$\bar{V} = \frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad \text{Velocidad Promedio.}$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{R}{2L} \frac{\Delta P}{L} = \frac{4\bar{v}}{R}$$

$$\tau_w = \frac{R}{2} \frac{\Delta P}{L} \quad \text{Distribución del flujo de momento}$$

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w}$$

η viscosidad Kg/mseg

R radio del capilar m

L longitud del capilar m

ΔP Caída de Presión Pa

$\dot{\gamma}_w$ Rapidez de corte en la pared del capilar s^{-1}

τ_w Esfuerzo cortante en la pared del capilar Kg/mseg

\bar{v} Velocidad promedio a través del capilar m/seg

Las características del flujo capilar se muestran en la figura 8. La línea continua representa el comportamiento Newtoniano, mientras que la línea punteada al comportamiento no-Newtoniano. En la primera gráfica se puede observar el perfil típico de un fluido por un ducto circular; en donde la velocidad tiene un valor de cero en las paredes del tubo ($-R$ y R), y un valor máximo en el centro del tubo en $R = 0$. En la segunda gráfica, se representa el perfil del esfuerzo cortante a través de una sección transversal de tubo circular; en las proximidades a la pared del tubo ($-R$ y R), el esfuerzo cortante es máximo; es decir, la fuerza por unidad de área requerida para mantener esas capas de fluido en movimiento es muy grande, ya que su velocidad es casi cero. La tercera gráfica representa la relación entre la velocidad de flujo volumétrico y el gradiente de presión axial; para fluidos Newtonianos sigue la ecuación de Hagen-Poiseuille.

Comunmente se aplican dos correcciones a los datos del capilar para obtener la viscosidad correcta del polímero fundido. La ecuación de Rabinowitsch corrige la rapidez de corte en la pared para fluidos no-Newtonianos:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)$$

$$n = \frac{d \log \dot{\gamma}}{d \log \tau}$$

en donde n es el exponente de la Ley de potencia.

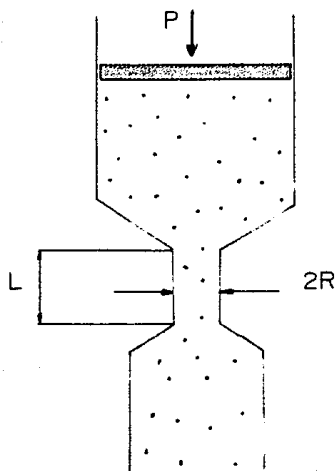


Fig. 7 Viscosímetro Capilar

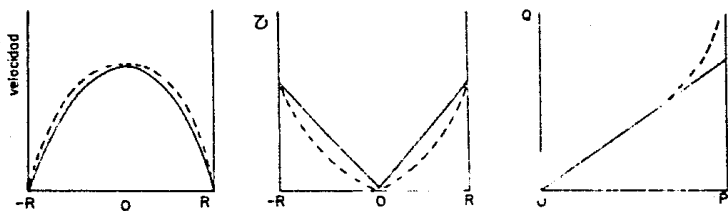


Fig. 8 Características Flujo Capilar

La corrección de Bagley corrige la no idealidad debida a los efectos viscosos y elásticos a la entrada del capilar; la longitud efectiva de un capilar es mayor que la longitud real, por lo que:

$$\zeta_w = \frac{R\Delta P}{2(L+eR)} = \frac{P}{2(L/R+e)}$$

El factor de corrección de Bagley (e), es independiente de la longitud del capilar, pero generalmente varia con la relación R/L debido a la elasticidad del polimero fundido, e se determina midiendo la caída de presión a rapidez de corte constante para varias longitudes de capilar, y extrapolando como se muestra en la figura 9.

4.4.3 Viscosímetro rotacional.

Este tipo de viscosímetro es un instrumento básico para la medición de la viscosidad. Es un buen instrumento para fluidos de baja viscosidad y es usado ocasionalmente para fundidos con viscosidades altas.

En este instrumento el fluido es colocado en el espacio anular entre dos cilindros. En una versión del aparato, el cilindro interior es rotado a velocidad constante y se mide el torque necesario para esta rotación. En algunos casos el instrumento se modifica de tal manera que el cilindro externo sea rotado (figura 10).

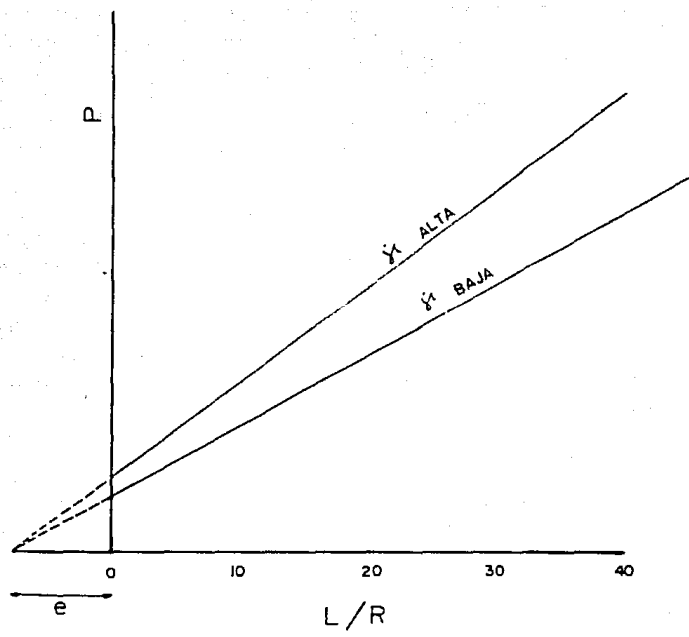


Fig. 9 Corrección de Bagley

La principal ventaja de este tipo de instrumento es que se obtiene una rapidez de corte constante si el espacio entre los dos cilindros es pequeño. Este es un factor muy importante para los polímeros no-Newtonianos en los que la viscosidad depende en gran medida de la rapidez de corte. En la figura 11 se muestran las características de este instrumento. En la primera gráfica se muestra el perfil de velocidad en el espacio anular del instrumento. En la segunda gráfica se observa el perfil de la rapidez de corte, siendo esta mayor en las cercanías del cilindro que gira (la rapidez de corte puede entenderse físicamente como la agitación del fluido). La tercera gráfica representa el perfil del torque requerido con respecto a la velocidad de rotación.

Para líquidos Newtonianos, las ecuaciones utilizadas para el viscosímetro rotacional son:

$$\eta = \frac{M}{4\pi h\omega} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) = \frac{Z_x}{\dot{\gamma}_x}$$

$$Z_x = \frac{M}{2\pi R_x^2 h} ; R_1 \ll R_x \ll R_2 \quad \dot{\gamma}_x = \frac{2\omega R_1^2 R_2^2}{R_x^2 (R_2^2 - R_1^2)}$$

M Torque Nm

ω Velocidad de Rotación angular rad/seg

R_1 Radio del cilindro interno m

R_2 Radio del cilindro externo m

h longitud del cilindro sumergido m

R_x Radio cualquiera entre R_1 y R_2 m

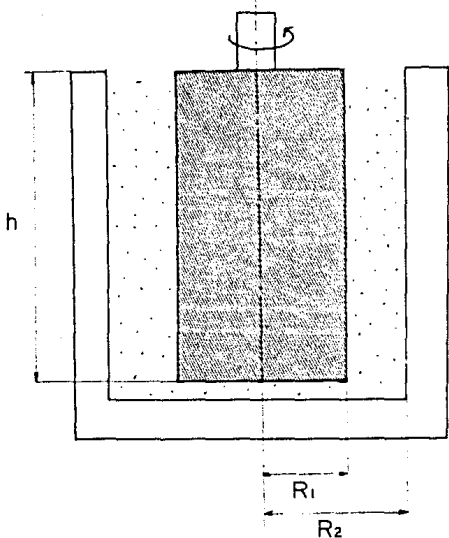


Fig. 10 Viscosímetro Rotacional

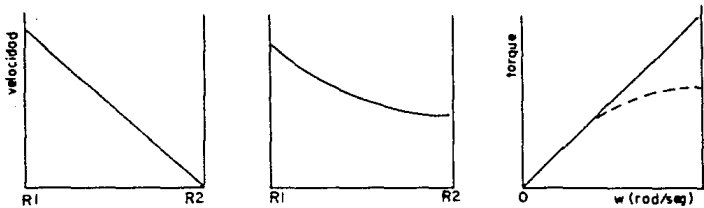


Fig. 11 Características Flujo Rotacional

5. EL EXTRUSOR DE TORNILLO.

Los extrusores de tornillo son prácticamente los únicos utilizados para la extrusión de termoplásticos. Estas máquinas se construyen con uno o dos tornillos, con una gran variedad de diseños. El extrusor de tornillo es probablemente la máquina que más ha contribuido al conocimiento teórico-práctico de la extrusión.

El proceso de extrusión es el mejor estudiado y aprehendido de todo el procesamiento de plásticos. Hoy en día son comunes los diseños por computadora de tornillos gracias a las intensas investigaciones y contribuciones de McKelvey /58/, Tadmor /7/, y Squires /59/.

En la figura 12 podemos ver el esquema de un extrusor de tornillo simple. Este consiste esencialmente de los siguientes elementos:

- 1) Un motor y sistema de reducción de velocidad, usado para girar el tornillo.
- 2) Una tolva de alimentación, en donde los gránulos son introducidos.
- 3) El barril, el cual contiene al tornillo y está equipado, en su parte exterior, con elementos para calentamiento y enfriamiento.
- 4) El tornillo o husillo, que plastifica los gránulos, los calienta hasta un estado viscoelástico, y los transporta hacia una boquilla.

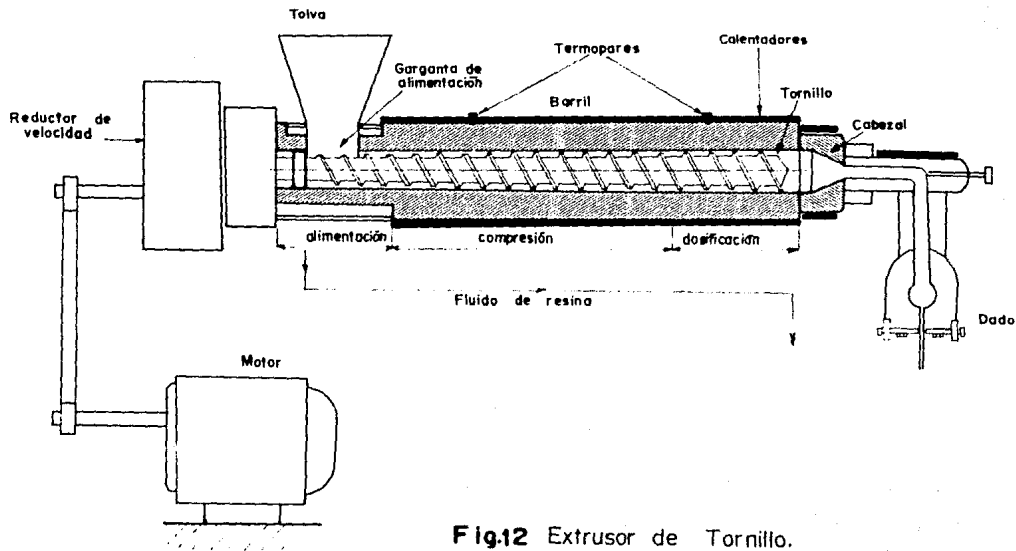


Fig.12 Extrusor de Tornillo.

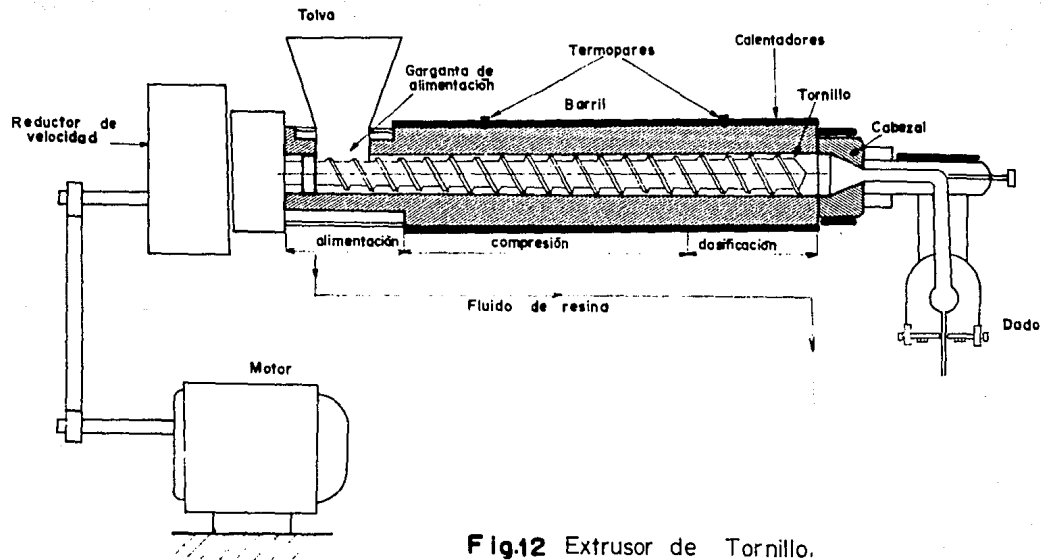


Fig.12 Extrusor de Tornillo.

5) Cabezal, mallas y platos rompedores para filtrar el fundido y crear una contrapresión.

6) La boquilla o dado, la cual determina el contorno del extruido.

7) Termopares, medidores de presión y demás instrumentación usada para indicar y controlar la temperatura, presión y velocidad de giro del tornillo.

El material plástico, en granulos o en polvo, es cargado a la tolva y se alimenta a través de la garganta de la tolva a la zona de alimentación del tornillo; el material es transportado hacia adelante y a cierta distancia, dependiendo de la naturaleza del material, diseño del tornillo y condiciones de operación, funde de una manera homogénea. El calor para fundir al material proviene de dos fuentes: calentadores externos del barril y el calor por fricción entre el material plástico y el tornillo y con el barril.

Durante el periodo de calentamiento y compresión, el plástico debe ser transformado en una mezcla homogénea. Esto elimina la posibilidad de superficies defectuosas o de una sección transversal no uniforme del producto final. El plástico fundido pasa a través de una malla, que remueve impurezas, y a través de la boquilla a una presión muy alta; de la boquilla el perfil extruido pasa a través de un sistema de enfriamiento y recolección; el extruido es finalmente ventilado y enrollado o cortado en longitudes específicas.

Esta operación es usualmente referida a una extrusión plástica, y al extrusor se le llama extrusor plásticos.

Si la alimentación es un polímero fundido, al extrusor se le llama *extrusor de fundido*.

5.1 *Tolva de alimentación.*

Es en la tolva donde se alimenta el material plástico al barril ya sea por medio de bandas transportadoras o manualmente. Usualmente está equipada con un vidrio transparente para mostrar la cantidad de material contenido, una descarga lateral y una válvula para cortar la alimentación. La tolva puede tener un sistema de compresión el cual, forzando la resina dentro de la garganta de alimentación, mantiene una alimentación positiva todo el tiempo, particularmente para materiales muy fluidos o de baja densidad. Puede tener también una malla ancha, la cual atrapa las impurezas muy grandes. Otros adelantos incluyen medios neumáticos para transportar los gránulos de la bolsa a la tolva, con controles de paro y arranque, de tal manera que la alimentación es totalmente automática.

Debajo de la tolva de alimentación está la garganta de alimentación. Esta tiene una chaqueta de agua fría, que tiene el fin de prevenir el fundido de los gránulos en la garganta y un subsecuente taponamiento de la misma, lo cual significaría una disminución en la alimentación y por lo tanto en la producción. En máquinas grandes, la tolva tiene capacidades de 230 a 450 kilogramos.

5.2 El Tornillo.

El elemento más importante en un extrusor es el tornillo o husillo. De acuerdo con la figura 13, el tornillo usualmente se divide en tres secciones: la zona de alimentación, la zona de transición y la zona de dosificación.

La zona de alimentación se diseña siempre con una profundidad de canal mayor que en las otras dos secciones; esto asegura una capacidad de transporte mayor en esta zona, por lo cual siempre hay material forzado a entrar a la zona de transición. El ángulo de hélice de las aletas del tornillo permanece constante a través de la zona de alimentación y de hecho se mantiene usualmente constante a lo largo del tornillo, principalmente por razones de fabricación. Se ha observado que el bombeo de sólidos más eficiente, ocurre cuando el coeficiente de fricción con respecto al barril es máximo y el coeficiente con respecto al tornillo es mínimo. Análisis teóricos de esta zona, muestran que el transporte de sólidos se optimiza con una profundidad de canal grande y con un ángulo de hélice apropiado. Un ángulo de hélice de 17.7° es un valor óptimo para muchos plásticos y facilita, además, la construcción del tornillo. La profundidad del canal de la zona de alimentación debe ser aproximadamente tres veces la de la zona de dosificación.

En la zona de transición, compresión o de fundido, la profundidad de canal es gradualmente disminuida, con esto se logra aumentar la presión en los gránulos y el calor generado por fricción. En esta sección del tornillo, los gránulos son

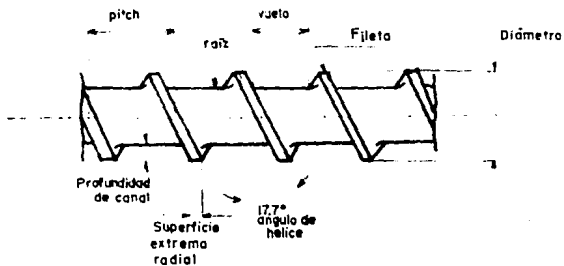
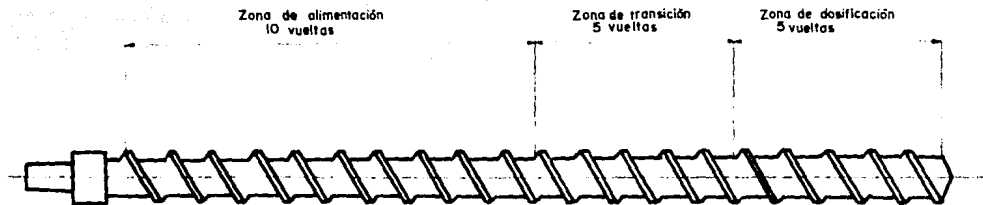


Fig.13 Nomenclatura del tornillo.

plastificados en un fundido homogéneo y de temperatura uniforme, el cual es forzado hacia la zona de dosificación.

La zona de dosificación tiene usualmente una profundidad de canal constante, la cual sin embargo, es menor que la de la zona de alimentación o de transición debido a esto el fundido es bombeado, a una velocidad uniforme, de esta zona a la boquilla.

Los tornillos se clasifican por su relación longitud a diámetro (L/D), criterio empleado también para clasificar a los barriles, ya que el claro entre el barril y las aletas del tornillo es muy pequeño. La relación L/D, es usualmente definida como la longitud de la porción aletada del tornillo dividida entre el diámetro de las aletas o el diámetro interior del barril.

TABLA IV RANGO DE L/D USADO EN LA INDUSTRIA.

L/D

12:1

* 24:1

* 20:1

30:1

33:1

* Rangos más comunes. //1/

Entre más grande sea la relación L/D, más grande será la superficie disponible para esfuerzos cortantes, mezclado y plastificado de los gránulos. Los tornillos se fabrican de acero para disminuir al máximo el desgaste de las aletas.

La descripción del tornillo dada, aplica a la gran mayoría de los tornillos en uso; sin embargo, ante la necesidad de mejorar calidad y aumentar niveles de producción, se han desarrollado mejores diseños para tornillos. De estos nuevos diseños y demás innovaciones tecnológicas en tornillos para extrusores se hablará en el último capítulo.

El rango de velocidad de giro del tornillo de un extrusor es de 20 a 200 rpm y por lo general se usan motores eléctricos cuya velocidad es de 1750 a 1800 rpm. Para poder girar el tornillo a una menor velocidad, se usa una unidad reductora de engranajes. La potencia requerida, generalmente es de aproximadamente un Hp para 2 a 4.5 kilos de material extruido por hora; la diferencia se debe al hecho de que algunas resinas, como el PVC, requieren mayor potencia que otras resinas para producir un adecuado esfuerzo cortante, tal es el caso del polietileno. La unidad reductora de engranajes está comunmente constituida de engranajes intercambiables los cuales proporcionan un rango de velocidades variables.

5.3 El barril.

El barril de un extrusor contiene al tornillo. éste es similar al tornillo en dimensiones: el diámetro interior del

barril es casi igual al diámetro exterior de las aletas del tornillo en la zona de dosificación, y la longitud es casi la misma que la del tornillo.

Además de contener al tornillo, el barril es también una fuente de calentamiento y enfriamiento para el material plástico, al estar rodeado de sistemas de calentamiento y enfriamiento.

El barril, usualmente, está hecho de una sola pieza bimetalica; debido a que las presiones desarrolladas durante la extrusión pueden ser muy altas dentro del barril, la mayoría se construyen para soportar arriba de las 10 000 psi (69 MPa).

Los tamaños estándar de los extrusores de tornillo (especificados por el diámetro interior del barril) son 1 1/2, 2, 2 1/2, 3 1/4, 3 1/2, 4 1/2, 6 y 8 pulgadas. /18/

El barril está soportado en todo su largo, por contactos deslizantes los cuales permiten libres expansiones o contracciones del barril al calentarse o enfriarse. Se utilizan también soportes auxiliares en el extremo de la boquilla para prevenir deformaciones cuando se emplean boquillas pesadas.

La mayoría de los calentadores usados son eléctricos; los más simples y baratos son bandas de resistencias aisladas por mica o cemento. Los calentadores, cualquiera que sea su tipo, deben ser capaces de calentar el barril a temperaturas hasta de 290 °C (550 °F).

Ya que existen tres zonas distintas en la longitud del tornillo, usualmente hay también tres zonas de calentamiento en el barril. Cada zona tiene su propio sistema de control y

medición de temperatura. Independientemente del tipo de elemento de calentamiento instalado en el barril, es importante que haga buen contacto con toda su superficie para asegurar la máxima transferencia de calor posible.

Enfriar el barril es algunas veces más importante que calentarlo, particularmente con las tendencias hacia mayores rendimientos, esto significa mayores temperaturas de fundido y como consecuencia, mayores posibilidades de degradación de la resina. El enfriamiento se logra por medio de aire, agua o en algunos casos, algún líquido especial. Un enfriamiento por aire se logra por medio de un ventilador, este sistema es simple, barato y tiene la ventaja de minimizar el impacto térmico en el barril. Por otro lado, tiene la desventaja de tener una baja eficiencia de enfriamiento.

5.4 Cabezal, plato rompedor y mallas.

Al final del barril se encuentra un cabezal, el cual contiene una malla, un plato rompedor, un medidor de presión y algún mecanismo para fijar la boquilla. Usualmente, el cabezal está construido de tal manera que sea fácil quitarlo del barril para dar mantenimiento al plato rompedor y a la malla.

Las mallas están formadas por un número de telas de alambre de varios tamaños según el tejido de la malla. Su función es escudar a la boquilla de contaminantes o partículas de resina no fundida de la corriente del fundido. El plato rompedor es un plato pesado de metal perforado con un número de agujeros o

ranuras, cuyo rango de tamaño va de 1/8 a 1/6 de pulgada. Su función es sostener y apoyar a la malla en contra de la presión ejercida por el fundido. Una función importante de la malla y del plato rompedor es romper las líneas de flujo, las cuales, debido al giro del tornillo, tienen forma de espiral: después de pasar por la malla y el plato rompedor, las líneas de flujo se alinean en dirección a la boquilla, lo que permite un conformado más uniforme. Una función secundaria de la malla es ayudar a desarrollar una contrapresión en el fundido, para dar un mejor mezclado y una mayor temperatura de fundido.

Uno de los problemas que se presentan con el uso de mallas y platos rompedores para generar presión es el taponamiento. Esto podría aumentar la presión demasiado y ocasionar un aumento en la temperatura del fundido y una subsecuente degradación del mismo; además, la necesidad de cambiar las mallas implica un paro del extrusor, con una pérdida en la producción. Un método para evitar este problema consiste en usar un cambiador de mallas hidráulico. La unidad opera de manera similar a un proyector de transparencias; cuando se indica un cambio de malla, la unidad, hidráulica o mecánicamente, desliza una nueva malla a su lugar y remueve la malla sucia. La operación se puede efectuar sin interrumpir el funcionamiento del extrusor; sin embargo, es posible encontrar alguna marca en el extruido debida a este movimiento.

5.5 La boquilla y equipo de salida.

El proceso de extrusión abarca una gran variedad de operaciones especializadas: contornos de perfiles, recubrimiento de alambre, producción de tubería, recubrimiento de papel y telas, producción de películas y láminas, etc. Todas estas operaciones tienen un elemento en común: el extrusor. Con excepción de la boquilla, los extrusores son más o menos iguales para todos los casos, sin embargo, las boquillas para cada tipo de producto son diferentes, así como el equipo de salida, medición, cortado, enrollamiento y almacenamiento.

5.5.1 Fabricación de película por soplado.

La producción de películas es una gran aplicación de la extrusión de termoplásticos. El proceso de soplado consiste en extruir el plástico fundido a través de una boquilla circular, para formar un tubo de pared muy delgada. El tubo es casi siempre extruido verticalmente y en cuanto sale de la boquilla, es expandido por medio de aire interno a presión, introducido a través del mandril o eje de la boquilla. El tubo se expande de 1.5 a 2.5 veces el diámetro de la boquilla. En la figura 14 se presenta un esquema de este tipo de boquilla y del equipo de salida. Debido a que la película se extruye verticalmente, la construcción de alojamiento para este proceso debe tener un techo de 10 a 15 metros de altura.

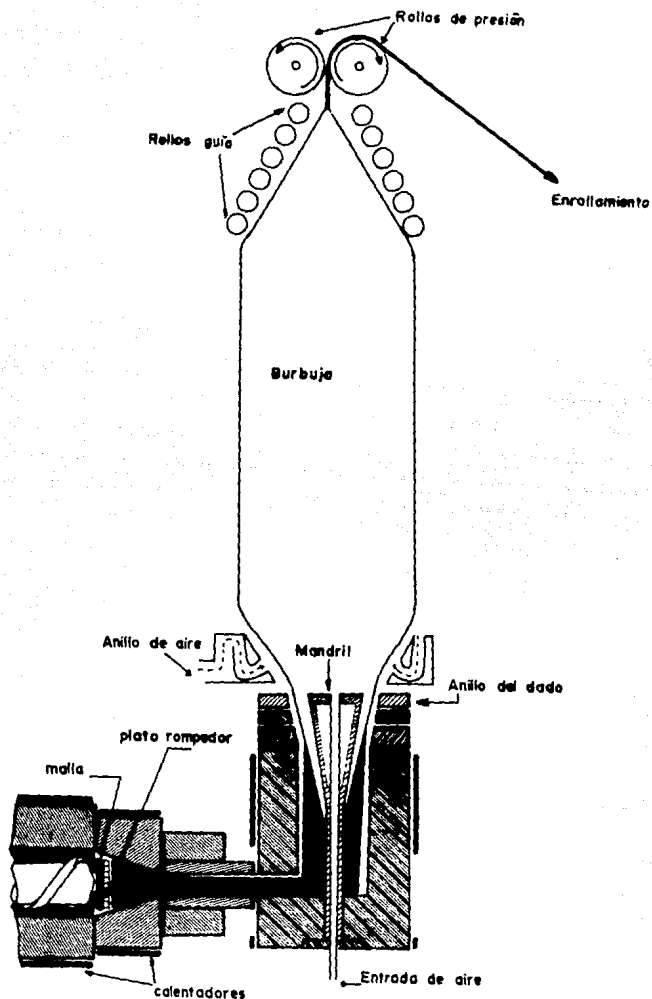


Fig.14 Producción de película por soplado.

La boquilla usada para hacer películas por soplado es similar a la usada para fabricar tubería, ya que ambas son circulares y con alimentación, ya sea al centro o lateral. Sin embargo existen diferencias importantes: la boquilla para soplado está hecha de tal manera que pueda rotar u oscilar alrededor del eje interno durante la operación de extrusión; también es posible la rotación del mandril mismo. Esta posible rotación minimiza el efecto de cualquier pequeña irregularidad presente en la boquilla o en el mandril. Tales irregularidades se manifiestan en la película, como partes frágiles o manchas.

A pesar de que se han dado enormes pasos en la extrusión de película por soplado a altas velocidades, con la introducción del polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) a la producción, se tiene, todavía, un largo periodo de desarrollo tecnológico intenso en los años venideros.

5.5.2 Extrusión de tubería rígida y flexible.

La extrusión de tubería rígida y flexible, consiste en una de las mayores aplicaciones del extrusor, y es, a la vez, una de las operaciones más simples. Un tubo rígido, es generalmente definido como un material cuyo diámetro es mayor a 1/2 pulgada, con una pared rígida. Algunos materiales comunes para tubos rígidos son polietileno, PVC rígido, ABS y acetato de celulosa. Un tubo flexible, es usualmente definido como un material flexible y de diámetro menor a 1/2 pulgada. La tubería flexible es comúnmente hecha de polietileno, PVC flexible, ABS y nylon.

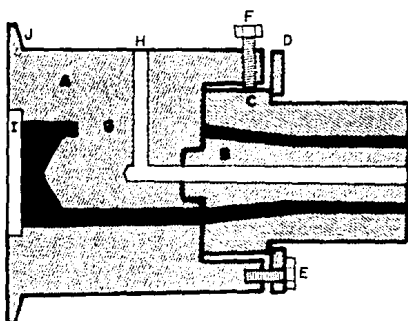
La boquilla usada para la fabricación, ya sea de tubería rígida o flexible, es de forma cilíndrica. En la figura 15 podemos ver un corte de una boquilla de este tipo.

Una vez que el tubo extruido deja la boquilla, éste debe ser enfriado y medido. La técnica más simple es pasar el extruido por un baño de agua en donde es enfriado y posteriormente cortado a las medidas deseadas. El equipo de salida para tubería flexible puede consistir en un equipo simple de enrollado; el equipo de salida para tubería rígida está generalmente hecho para asir con firmeza el tubo enfriado, pero sin causar alguna distorsión en el mismo.

5.5.3 Extrusión de láminas.

Por convención, el término *película* es usado para material cuyo espesor es menor a 0.01 pulgadas, y *lámina* para el material plástico cuyo espesor es mayor. Los materiales más usados en este proceso son poliestirenos de alto impacto; sin embargo, también se usan en grandes cantidades: polietileno de alta densidad, PVC, ABS, celuloide y nylon.

Para este proceso se usa una boquilla con una salida en forma de ranura. Gracias a las altas presiones que se usan en la boquilla, se evita que el fundido fluya solamente por la parte central de la ranura. Una barra estranguladora se usa para regular el espesor del fundido que emerge de la boquilla. La figura 16 ilustra la sección transversal de una boquilla para laminado, ilustrando la barra estranguladora.



- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| A. Cuerpo del dado. | F. Tornillo centrador. |
| B. Mandril macho. | G. Patas de araña. |
| C. Mandril hembra | H. Entrada de aire. |
| D. Anillo sujetador. | I. Asiento del plato rompedor. |
| E. Tornillo sujetador. | J. Anillo fijador al extrusor. |

Fig.15 Boquilla para extrusión de tubería.

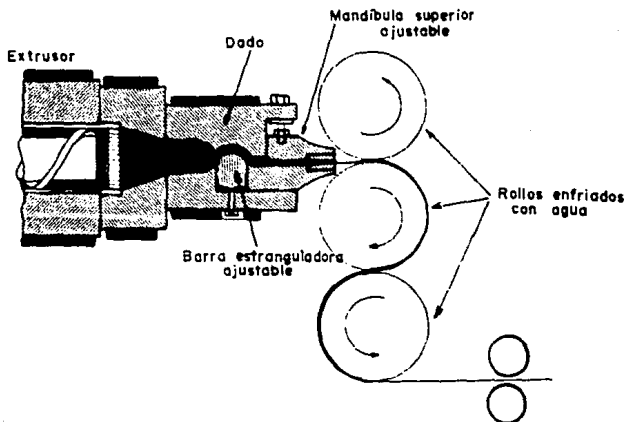


Fig.16 Eqquilla para extrusión de lámina.

Los rollos enfriadores, mostrados en la figura 16, se mantienen a temperaturas específicas circulando agua; algunas veces se usa aceite si se requieren mayores temperaturas como en el caso de poliolefinas.

TABLA V TEMPERATURAS TÍPICAS DE LAMINADO DE ABS.

Rollo superior:	347- 437 °F	(175- 225 °C)
Rollo medio:	302- 437 °F	(150- 175 °C)
Rollo inferior:	347- 437 °F	(175- 225 °C)

/17/

Una vez que la lámina sale de los rollos enfriadores, ésta viaja a los rollos de empuje, a una distancia de aproximadamente tres metros; durante este trayecto, la lámina es usualmente soportada por pequeños rollos, y puede ser también enfriada por ventiladores. De los rollos de empuje, la hoja es usualmente cortada automáticamente y almacenada en forma de hojas extendidas o, si la lámina es delgada, en forma de rollos.

5.5.4 Recubrimiento por extrusión.

El recubrimiento de papel, hojas de metal, telas u otros materiales, es otra gran aplicación del proceso de la extrusión. Para aplicar el recubrimiento se utilizan un extrusor y una serie de rollos (figura 17). El rango típico de espesor de recubrimiento va de 0.5 a 2 milésimas de pulgada.

Los recubrimientos se usan con el fin de mejorar una o más propiedades del material, por ejemplo, como barrera contra el polvo, contra gases, para aumentar la resistencia al desgarramiento, o para poder sellar con calor. El embalaje comercial es una de las principales líneas de productos. El consumo más grande de materiales cubiertos es el del papel cubierto con polietileno para fabricar cartones para contener leche.

El proceso de recubrimiento por extrusión es, en muchos aspectos, similar a la producción de láminas, excepto que se utiliza un sólo extrusor, y además el sustrato (papel, hoja, etc.) es calentado. Otra diferencia es que el fundido extruido y el sustrato, se mezclan por medio de rodillos de hule, los cuales ejercen presiones de hasta 100 lb/plg. Esto impulsa a la resina dentro de las fibras del papel, o produce una adhesión máxima a un sustrato metálico. Con el fin de aumentar la adhesión, se usan *primers* en el sustrato.

La boquilla usada en este proceso es similar a la usada para laminado, pero aquí no se usa barra estranguladora ya que no hay necesidad de ajustar el espesor del fundido.

5.5.5 Recubrimiento de alambre.

El recubrimiento plástico de alambre, es otro gran uso del proceso de extrusión. Este proceso es similar a la extrusión de tubería rígida o flexible, excepto que el mandril del dado es reemplazado por una guía a través de la cual, se alimenta una

línea continua de alambre (figura 18). A medida que el plástico fluye a través de la boquilla, este rodea al alambre en movimiento, el cual previamente es calentado a la temperatura del fundido, y deja la boquilla como una unidad integral. Se usan muchos termoplásticos en el recubrimiento de alambre y cable; los polietileno, PVC y nylon son resinas típicas para el recubrimiento de alambre. También se usa silicona para aplicaciones de alta resistencia al calor.

5.5.6 Extrusión de perfiles.

Se llama extrusión de perfiles, a la extrusión de contornos especiales como orillas para mesas, canales para ventanas, acabados interiores de automóviles, filamentos y todo tipo de contornos. En este tipo de proceso, la extrusión se convierte más en un arte que en una ciencia, ya que la forma que se le puede dar al perfil es prácticamente ilimitada. La manufactura de perfiles por medio de la extrusión de termoplásticos a través de boquillas de geometría complejas, es una práctica común en la industria del plástico. El diseño del dado requiere de un claro y completo entendimiento del fenómeno en el extrusor.

Un factor importante a considerar, es que la mayoría de los perfiles extruidos tienen un tiempo de vida relativamente corto, es por esto que las boquillas se fabrican al menor costo posible. El dado o boquilla pudiera ser simplemente un plato de acero con un orificio de la forma deseada.

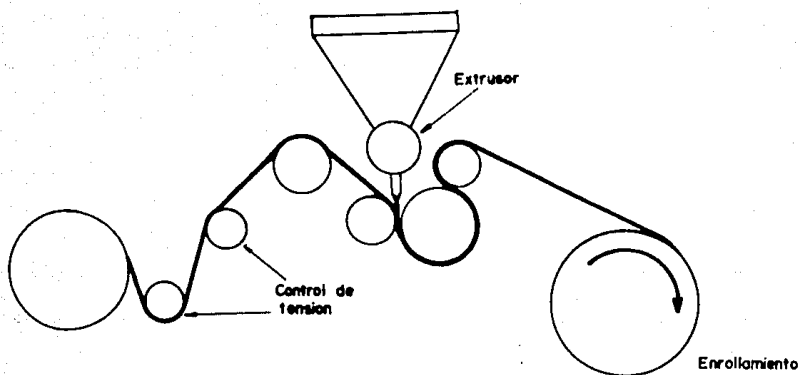


Fig.17 Recubrimiento por extrusión

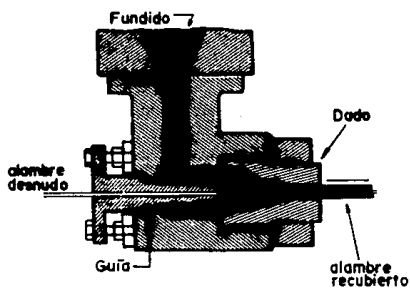


Fig.18 Recubrimiento de alambre

El mayor problema para el diseño adecuado de boquillas para uso en extrusión de perfiles, es el hinchamiento y encogimiento del extruido. Desde el momento en que el extruido sale de la boquilla hasta que es completamente solidificado, sus dimensiones se ven modificadas por el hinchamiento del extruido y encogimiento simultaneo durante el enfriamiento.

El hinchamiento del extruido, es una propiedad viscoelástica del polímero fundido que fluye fuera de la boquilla. Está asociado con un mecanismo elástico: la *relajación elástica*.

Este mecanismo puede ser ilustrado desde un punto de vista molecular. Una cadena lineal de polímero flexible, tiene una conformación de filamento al azar, de forma esférica en promedio. En un campo de esfuerzo cortante, la conformación tiende a ser de forma helicoidal y orientada en la dirección del flujo. Cuando el polímero sale del dado, todas las fuerzas externas son removidas, por lo que la conformación regresa a la forma esférica preferida. Esto causa una contracción axial y un hinchamiento en la sección transversal. Esto ilustra el mecanismo de relajación elástica.

5.6 Variables de control en el proceso de extrusión.

Las variables de control para operar un extrusor se resumen en la siguiente tabla:

TABLA VI VARIABLES DE CONTROL EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.

RPM del tornillo, en rpm.

Potencia suministrada para el giro del tornillo, en watts.

La alimentación del material plástico, en Kg/ Hr.

La temperatura en la garganta de la alimentación, en K.

La temperatura de operación en las tres zonas de calentamiento del barril, en K. /18/

La potencia suministrada se fija en función de la capacidad del extrusor en libras por hora (G_e), de la capacidad calorífica del material plástico en BTU/ lb °F (C_p), y de la diferencia de temperaturas desde la alimentación hasta la salida del extruido (DT) en °F, de acuerdo con la siguiente ecuación:

(9) /18/

La alimentación puede ser en gránulos, polvo o tiras, y se debe cuidar que siempre haya material dentro de la tolva.

La temperatura en la garganta de alimentación debe ser baja para evitar posibles taponamientos.

La temperatura de operación es función de la temperatura de transición vítrea (T_g), de la temperatura de fundido y de la degradación térmica del material plástico.

La temperatura de fundido de un polímero (f_m), usualmente se refiere a un intervalo de temperatura, debido a que un polímero está constituido de más de un peso molecular, de más de un tamaño de cristal. La temperatura de fusión puede ser

caracterizada como el cambio abrupto en el volumen específico del polímero, al cual se le llama *transición de primer orden*.

Un polímero amorfo lo podemos imaginar como un cúmulo de gusanos, debido a que las moléculas de un polímero están en constante movimiento. La intensidad de movimiento aumenta con la temperatura. Las propiedades de un polímero cambian al pasar una cierta temperatura debido a un mecanismo llamado *transición vítrea*. A este rango de temperatura se le llama *temperatura de transición vítrea* (T_g). En este punto las propiedades del material pasan de aquellas propias de un material duro y quebradizo, a las de un material blando y flexible. Este importante parámetro puede ser caracterizado también, como un punto de inflexión en la curva volumen específico contra temperatura. El paso a través de la temperatura de transición vítrea es llamado *transición de segundo orden*, debido a que el cambio en volumen no es discontinuo como en el caso de la temperatura de fusión.

Los efectos de transición vítrea son muy notorios en polímeros amorfos; por abajo de T_g , la energía térmica es insuficiente para permitir a las cadenas de átomos hacer algo más que vibrar en sus posiciones de equilibrio. Las cadenas de polímeros están *fijas* en sus posiciones y el polímero es parecido al vidrio y es quebradizo. A medida que la temperatura pasa a través de T_g , y más allá de la T_g , se generan mayores movimientos en las cadenas, y las propiedades del polímero reflejan este movimiento molecular, primero, haciéndose más

fuerte y flexible, y finalmente más parecido al hule en naturaleza.

Cuando se extruyen termoplásticos, es necesario enfriar al extruido por abajo de la T_m o T_g con el objeto de ganar estabilidad dimensional. En algunos casos esto puede lograrse simplemente pasando el extruido por un tanque de agua o, más sencillamente, por enfriamiento con aire. En la siguiente tabla se presentan algunos ejemplos de valores de T_m y T_g . /18/

TABLA VII. TEMPERATURAS DE FUNDIDO Y DE TRANSICIÓN VITREA.

Polímero.	T_m (°C)	T_g (°C)
Poliéstero	137	-120
Policloroetano	80	-50
Cloruro de polivinilo (PVC)	212	87
Poliestireno	240	100

/18/

Para poder operar correctamente a un extrusor, y para obtener un objeto plástico de alta calidad y que cumpla con la función para la cual fué diseñado, las propiedades del material plástico juegan un papel muy importante. En la siguiente tabla se enlistan algunas de las propiedades a considerar de tres termoplásticos.

Tabla VIII. PROPIEDADES DE TRES TERMOPLÁSTICOS.

	Poliétileno	Polipropileno	ABS
De procesamiento:			
Gravedad específica	0.95- 1.45	0.902-0.910	1.02
Mecánicas:			
Fuerza tensil (psi)	1600- 4600	4300- 5500	2500- 8000
% elongación	10- 440	200- 700	20- 100
Módulo elástico de tensión (psi X 10 ⁻⁸)	0.5- 5	1.60- 2.25	1.3- 3.8
Módulo elástico de flexión (psi X 10 ⁻⁸)	0.7- 3.5	1.7- 2.5	1.3- 4.2
Módulo de compresión (psi X 10 ⁻⁸)	0.5- 1.5	1.5- 3	1.5- 3.9
Térmicas:			
Resistencia al calentamiento (°F)	275	225- 260	140- 200

6. EL EXTRUSOR DE DOBLE TORNILLO.

El extrusor de doble tornillo ha sido desarrollado principalmente para el procesamiento de PVC rígido. Las diferencias básicas en la manera en que se operan un extrusor de tornillo simple y uno de doble tornillo son las siguientes: los extrusores de tornillo simple, operan en virtud de que la fricción entre el material y el barril del extrusor, es mayor que la fricción entre el material y el tornillo, causando que el material sea transportado hacia adelante. Por otro lado, el extrusor de doble tornillo transporta al material pasándolo de un tornillo a otro y dando un efecto de bombeo positivo. La producción de material plástico de un extrusor de doble tornillo, es normalmente controlada por la cantidad de material alimentado a los tornillos, más que por el ajuste de la velocidad del tornillo como en el caso del extrusor de tornillo simple.

Otra diferencia importante consiste en que el extrusor de tornillo simple genera una cantidad considerable de calor por esfuerzo cortante, tanto que a veces los extrusores tienen que ser enfriados constantemente para mantener las temperaturas requeridas. Los extrusores de doble tornillo, producen poco calor por esfuerzo cortante, y dependen únicamente de la entrada de calor del barril.

Los extrusores de tornillo simple dependen, particularmente en operaciones de mezclado, en el desarrollo de una contrapresión relativamente alta, por lo que con boquillas de

área de sección transversal grande, es difícil lograr estas presiones. El extrusor de doble tornillo, es poco afectado por el tamaño del área de sección transversal del dado.

Resumiendo, podemos decir que las principales ventajas de un extrusor de doble tornillo son:

- a) Mejor control de temperatura,
- b) Mejor acción de mezclado,
- c) Capacidad de operar con dados de sección transversal grande,
- d) Mejor remoción de aire ocluido.

En un extrusor de doble tornillo, los tornillos pueden ser del tipo co-rotativo, ya sea en sentido de las manecillas de un reloj o en sentido opuesto, o del tipo contra-rotativo, en cuyo caso la rotación es hacia el interior. Los tornillos del tipo contra-rotativos, dan un mayor efecto de mezclado, mientras que los del tipo co-rotativos, ofrecen un mejor desempeño de autolimpiado.

7. LA EXTRUSION EN LA DECADA DE LOS NOVENTAS.

A continuación se presenta un panorama general de lo que se espera de la industria del plástico, y en particular del proceso de extrusión, para la década de los noventas. Debido a que la fuente de información para este capítulo fue principalmente revistas especializadas norteamericanas, no debemos perder de vista que el panorama nacional es muy diferente; sin embargo, este tipo de análisis sirve de referencia para saber a cuáles áreas se les debe dar prioridad y hacer investigación dentro de esta industria, para tener calidad y niveles de producción que resulten competitivos.

MEJORAMIENTO DE EXTRUSORES VIEJOS.

El mejoramiento de extrusores con lo último en tecnología en extrusión, aumenta la productividad y eficiencia de las líneas viejas; al mismo tiempo puede abrir puertas a nuevos materiales y a la coextrusión. *

Este proceso de mejoramiento o renovación del extrusor puede realizarse con un costo que va del 30 al 70 % del costo de una línea nueva. Las ventajas que presenta este tipo de decisiones son:

-
4. Se lleva coextrusión al proceso por medio del cual dos o más polímeros son simultáneamente extrudidos a través de una boquilla.

- 1) Se incrementa la productividad.
- 2) Se minimiza el desperdicio de material y se mejoran propiedades físicas del producto.
- 3) Se pueden extruir eficientemente materiales difíciles de trabajar, tal es el caso del LLDPE.
- 4) Se reducen los costos de operación.
- 5) Permite la posibilidad de cambiarse de un mercado en decadencia a uno de productos de mayor valor.
- 6) El personal de la planta está familiarizado con los extrusores existentes; incluso con nuevos controles, la curva de aprendizaje en una máquina renovada es considerablemente más corta que la de una máquina nueva.
- 7) La instalación de un nuevo sistema de extrusión puede tomar un lapso de tiempo considerable (de tres a cuatro meses es el estimado) uno puede instalar su extrusor renovado en su localización original con todas sus conexiones y contactos listos.
- 8) Esto puede traer nuevas oportunidades de negocios sin la necesidad de recapitalizar, en uno de estos negocios se podrían producir nuevos materiales, como el LLDPE, el cual requiere de un mayor torque y potencia, además de barriles y tornillos especiales. Esto ofrece una alternativa muy buena para la industria mexicana, en especial para la pequeña y mediana industria, la cual con inversiones relativamente bajas pueda renovar sus extrusores y entrar a mercados competitivos /23/ /31/. Los cambios recomendables se tienen que dar en función al material que se trabaja y al mercado que se atiende. sin embargo

de manera general podemos decir que un buen comienzo es centrar este mejoramiento en lo que es el tornillo y en buscar automatizar el sistema de control de temperatura.

SISTEMAS DE EXTRUSION PARA RECICLAR DESECHO PLASTICO.

La escasez y costo de la materia prima, así como el problema de la contaminación ambiental, hace del reciclaje de desecho plástico una consideración atractiva. El reciclaje de desecho plástico contaminado, industrial y de consumo doméstico, en un material de provecho, conjuga los tres temas mencionados y abre nuevos mercados minoristas para la industria del plástico.

Un sistema para procesar desecho plástico, ya sea industrial o de consumo doméstico, es capaz de moldear un producto útil a partir del desecho plástico que ha sido mezclado y contaminado con papel, cobre, aluminio, madera y otros desperdicios. El material reciclado es llamado Syntal, palabra formada por las siglas de synthetic alternative. Syntal puede ser usado en la fabricación de productos para la agricultura, marina, construcción, industria en general y aplicaciones relacionadas. Hoy en día, 14 de estos sistemas están en operación a lo ancho del mundo. /42/

El sistema de reciclaje usa desecho plástico de post-consumo (PPC) como fuente de materia prima. El PPC típico contiene de un 50 a un 65 por ciento de polietileno y polipropileno y porcentajes variables de PVC y poliestireno, así

como PET, ABS y otras resinas de ingeniería usadas para embalaje y aparatos domésticos.

El polietileno y el polipropileno actúan como adhesivos, uniendo el fundido de plásticos y contaminantes para formar un material de estructura homogénea. Naturalmente, la adición de mayor o menor cantidad de cualquier material causará un cambio en el producto final. Por razones económicas se prefiere el plástico que ha sido previamente separado del desecho no plástico. Si el plástico está altamente contaminado con desecho orgánico húmedo, se requerirá un proceso simple de lavado. Sin embargo, el desecho plástico común y seco, con residuos de metal, madera o suciedad es aceptable.

El desecho de bolsas o películas de plástico es una fuente de material crudo ideal para el sistema. Las películas de plástico cubiertas de aluminio para embalaje, son también material reciclable.

La alimentación al sistema, debe ser material más o menos del mismo tamaño y densidad antes de la extrusión, para asegurar una alimentación consistente. Las películas y demás material crudo ligero deben ser densificados antes de ser alimentados, de otra manera dentro del tornillo se formarán huecos, dando como resultado una disminución en la producción, enfriamiento prematuro de algunas partes o llenado incompleto del molde.

Una vista a un corte transversal del Syntal, muestra como los contaminantes (alambre, papel, madera y plástico sin fundir) se concentran hacia el centro del fundido. Las orillas externas están casi libres de contaminantes. También se notan huecos,

causados por polvo atrapado, cerca del centro del material. Estos huecos hacen al producto extruido más ligero y mejora de manera general su fuerza y flexibilidad.

AUTOMATIZACION DE LA EXTRUSION.

El proceso de extrusión ha avanzado hoy en día, hasta el punto en que el objetivo de la mayoría de los procesadores no es la máxima producción, los avances tecnológicos y lo que a venido a ser una *economía mundial interrelacionada*, ha forzado a los procesadores a enfocarse primariamente en lo que es calidad del producto y productividad.

En los últimos años, varios desarrollos tecnológicos han jugado papeles claves en la extrusión:

1) La producción de película por soplado puede procesar varias resinas en la misma línea de proceso.

2) La producción de película por soplado está usando la coextrusión para tener mayor flexibilidad de procesamiento.

3) Los métodos auxiliares para procesamiento están permitiendo usar dados con salidas muy delgadas sin causar fractura en el flujo para LLDPE.

4) La producción de láminas está utilizando bombas de engranes, controles por microprocesadores en un esfuerzo por producir un producto consistente.

5) La producción de láminas está usando dados más largos que en otros tiempos, y lo mismo sucede con la coextrusión.

6) La extrusión de tubería y perfiles está usando también controles automáticos.

Un factor que se mantiene constante en todas estas tendencias actuales es la automatización en las líneas de extrusión; esto se está logrando a través del uso del sistema de integración industrial por computadora (SIIC). Este sistema tiene un objetivo general: el de aumentar la productividad a través de un control por circuito cerrado de una o más líneas de extrusión desde un sitio central. La mayoría de estos sistemas utilizan un monitor digital, el cual permite al operador tener acceso y analizar datos de proceso simplemente tocando cierta área de la pantalla.

Estos sistemas automáticos de supervisión también almacenan recetas de producción, las cuales pueden ser almacenadas en la memoria de la computadora hasta que haya necesidad de correr ese producto en particular, entonces la receta es cargada automáticamente al controlador individual de la línea de extrusión. Con esto se ahorra mucho tiempo y se eliminan los posibles errores del operador.

El uso de este sistema ha revolucionado la manera de organizar una planta de extrusión; cualquier compañía que use extrusión ya no tendrá que depender de su mejor operador para producir un producto con buena calidad. Este sistema permite al procesador elevar su productividad de extrusión del promedio de todos sus operadores al promedio del operador más productivo.

Actualmente este sistema puede implementarse en una planta con una o más líneas de extrusión de una manera modular, es decir, paso por paso. Se comienza creando lo que se llama *islas de automatización* en los puntos críticos del proceso o donde la producción lo demande, y después se van uniendo estas islas para crear un sistema a gran escala abarcando todas las islas de automatización y controlado desde una sola unidad. De esta manera una planta puede ir implementando su SIIC paso a paso, adicionando potencia en control paulatinamente; con esto la inversión en este sistema se hace más ligera y más accesible.

La falta de operadores capacitados y los problemas con el personal son las principales dificultades que los usuarios han encontrado al implementar el SIIC. Aparentemente los problemas con el personal son más complejos de lo que parecen, principalmente por el corte de personal como consecuencia de la automatización.

NUEVOS DISEÑOS DE TORNILLOS.

Los tornillos en la década de los noventa tendrán mayor demanda en aplicaciones más específicas a medida que nuevas resinas, mezclas y aleaciones de *alto rendimiento* sean introducidas al mercado.

El diseño de tornillos para extrusión, usados en extrusores de tornillo simple, está avanzando paralelamente al desarrollo de nuevos materiales. Algunos diseños se basan en los diferentes puntos de fusión de los materiales, mientras que otros se basan

en la necesidad de mezclar aditivos con el material plástico. Los resultados finales son un aumento en el rendimiento de las operaciones de extrusión y una mayor calidad en los plásticos.

Para satisfacer la demanda de plásticos más resistentes, más seguros y estéticamente más agradables, los procesadores están usando mezclas de resinas con aditivos especiales y colorantes. Tales modificaciones cambian las características reológicas de la resina y la estabilidad en la temperatura de la mezcla. La extrusión de esta nueva mezcla es diferente que la de la resina virgen. Los nuevos diseños en tornillos ayudan a enfrentar estos nuevos retos, permitiendo al procesador a usar la mezcla de materiales óptima para un producto dado.

Un ejemplo importante en donde una modificación al diseño de un tornillo ha sido significativa, es en el caso de mezclas que contienen polietileno lineal de baja densidad (LLDPE). En los últimos años se ha combinado LLDPE con polietileno de baja densidad (LDPE) para fabricar películas por soplado más durables. Con mayores concentraciones de LLDPE se hacen mejores películas por soplado, pero la extrusión de la mezcla es más difícil debido a que el LLDPE funde a menor temperatura que el LDPE. Para superar este problema, los nuevos diseños de tornillos permiten procesar la mezcla a menores temperaturas de fusión y dan mejores características de funcionamiento a la película terminada.

Hoy en día, el diseño de tornillos está basado en la computación, sin embargo, cuando se desarrolla un nuevo material, para que pueda funcionar efectivamente un modelo por

computadora se tiene que recurrir primero al laboratorio para encontrar las propiedades reológicas y térmicas del nuevo material.

Los nuevos diseños de tornillos para extrusores mejoran una o más de las funciones básicas que el tornillo desempeña: fusión, mezclado y bombeo. De estas tres, la fusión es la más crítica. Se pueden usar otros factores en el control del mezclado y bombeo, pero el diseño de tornillos tiene un efecto directo en la fusión. Hoy en día la mayor parte de la actividad de investigación está dirigida a la optimización de la fusión de la resina.

La fusión de la resina plástica está controlada por dos fuentes de calentamiento. Por un lado, el calor aplicado externamente, usualmente por medio de calentadores en el barril; este calor es transferido por conducción. La otra fuente es el calor generado por esfuerzo cortante, este tipo de calor es disipativo. El exceso de calentamiento, especialmente el calor por corte, puede descomponer resinas tales como el LLDPE.

El calentamiento puede ser controlado cambiando la velocidad de rotación del tornillo. Una menor velocidad de giro hace que el fundido esté en contacto con el barril y con el tornillo por un tiempo mayor; esto hace que la mezcla fundida se caliente sólo por conducción. Las velocidades bajas de giro producen esfuerzos cortantes bajos con lo cual se reduce el calor disipativo y se aumentan las propiedades del producto.

Lo que hace que un tornillo sea eficiente, es su balance. Un buen tornillo está diseñado de tal forma que la primera

sección del tornillo entregue la cantidad correcta de material a la última parte del tornillo. La velocidad de entrega a la parte final del tornillo depende de varios factores, entre ellos: la temperatura de fundido de la mezcla, la reología de la mezcla y la profundidad de canal del tornillo. Para una mezcla dada de resina y aditivos, las primeras dos condiciones están fijadas, por lo que la profundidad de canal del tornillo será la variable a fijar para lograr el funcionamiento óptimo.

En los últimos años ha habido un incremento en el uso de los llamados *tornillos de barrera* en lugar de los tornillos convencionales para mezclado. Este tipo de tornillos se usa principalmente en la fabricación de películas por soplado usando LLDPE y también en la fabricación de láminas. El tornillo de barrera ofrece mayores velocidades de producción con bajas temperaturas de fundido bajo condiciones de proceso más estables.

Todos los tornillos de barrera están basados en un mismo principio: a lo largo de la zona de transición del tornillo se introduce una aleta adicional conocida como *aleta de barrera*. Los dos canales formados (ver figura 19) se llaman *canal de sólidos* y *canal de fundido*, respectivamente. El canal de sólidos, conteniendo a la resina que no ha fundido, se localiza del lado de empuje de la aleta de barrera, mientras que el canal de fundido se localiza en el lado opuesto. La aleta de barrera, que separa a los dos canales, tiene un claro mayor que el claro normal de las demás aletas: esto permite el flujo del polímero fundido del canal de sólidos al canal de fundido y la retención

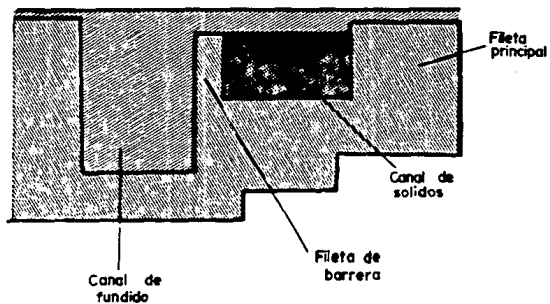


Fig.19 Tornillo de Barrera

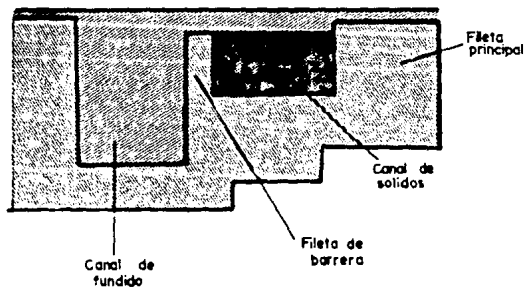
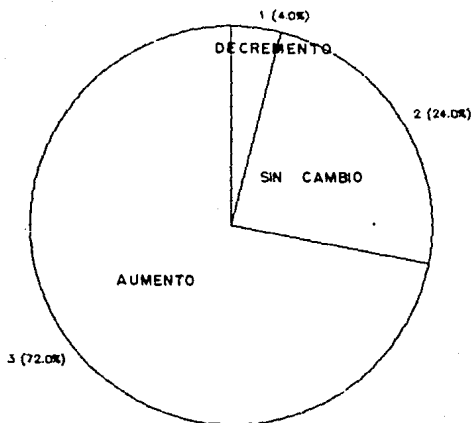
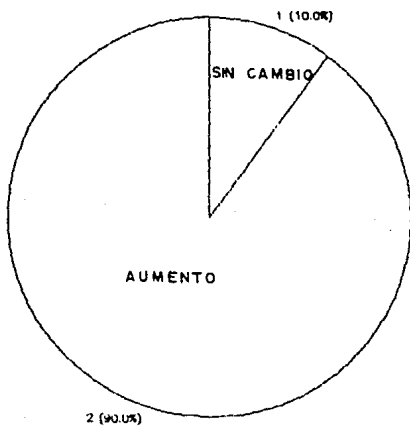


Fig.19 Tornillo de Barrera

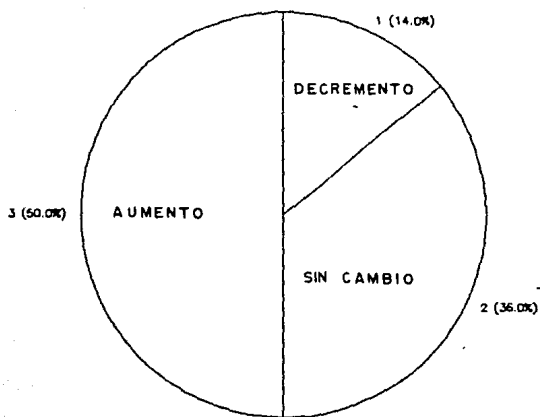
CONSUMO DE PLASTICOS EN 1990.



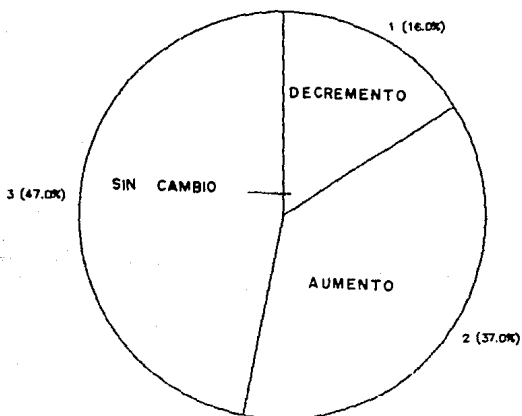
TERMOPLASTICOS DE INGENIERIA EN 1990.



TERMOPLASTICOS DE CONSUMO NORMAL EN '90



CONSUMO DE TERMOFIJOS EN 1990.



de las partículas sólidas. Esto ayuda a aumentar el tiempo de residencia del material sólido aumentando la velocidad de fusión, mientras que el material que ya ha fundido pasa más rápido evitando así un sobrecalentamiento.

LA INDUSTRIA DEL PLASTICO EN LOS NOVENTAS.

La revista especializada *Plastics Technology*, en el mes de enero de 1990 /48/, publicó una encuesta realizada a 105 empresas líderes en la industria del plástico sobre los mayores retos que tendrá que enfrentar la industria del plástico en la década que comenzamos. Dentro de estas 105 empresas, 21 fueron procesadoras de plásticos, 33 abastecedoras de materiales, 8 abastecedoras de aditivos, 41 abastecedoras de equipo y paquetería para computadoras y 2 empresas de asesoramiento.

El consenso general fue la necesidad de adquirir un amplio rango de equipo sofisticado, de establecer un acercamiento más estrecho con el cliente y el abastecedor, de tener mayor flexibilidad y reflejos más rápidos para poder responder de manera agresiva a las nuevas oportunidades en tecnología y negocios. También la computerización y la adquisición de personal altamente capacitado serán la agenda para tener éxito en los noventas.

En cuanto al consumo de plásticos en esta década, de acuerdo con la encuesta, un 72 por ciento espera un crecimiento en el consumo de plástico para uso doméstico más rápido que en los ochentas, un 90 por ciento cree que los termoplásticos de

Ingeniería tendrán un crecimiento más rápido en los noventa que en los ochenta; el consenso es menor para los termoplásticos de consumo normal: 50 por ciento espera un crecimiento más rápido, 36 por ciento no espera algún cambio y 14 por ciento espera un decremento en el consumo para esta década. Para los termofijos, 47 por ciento no espera algún cambio, 37 por ciento espera un crecimiento más rápido y 16 por ciento un decremento.

En extrusión, uno de los temas más candentes del área se espera que sea la coextrusión: la producción de perfiles también será un área prioritaria seguida de la producción de láminas, películas por soplado, producción de tubería y recubrimiento de alambre y cable.

Dos temas fueron una constante en la encuesta: el reciclaje de desecho plástico y la cuestión del medio ambiente. Un 44 por ciento de las empresas cree que el reciclaje será un factor muy importante en el diseño y manufactura de productos durables así como en el embalaje en esta década, otro 44 por ciento cree que el reciclaje será un factor de cierta importancia y sólo un 11 por ciento cree que no tendrá importancia.

Otro tema prioritario fué el de la capacitación de personal. No parece haber duda que la clave para esta década será la preparación de personal altamente capacitado para coordinar y usar el equipo sofisticado y demás herramientas requeridas para estar dentro de la competencia. Los procesadores colocan al entrenamiento en operación de maquinaria y en mantenimiento como primer punto en su lista, seguido del entrenamiento y capacitación en control de calidad. Este

entrenamiento y capacitación se espera que se dé en las propias empresas, y en las universidades.

De acuerdo con la encuesta, en los noventa se verán grandes avances tecnológicos en el desarrollo de nuevos materiales, en el procesamiento, en el diseño de maquinaria y en la tecnología de controles. Los tres procesos de mayor importancia dentro de la industria del plástico se espera que sean la coextrusión, el moldeo por inyección y el moldeo por soplado.

8. DISCUSION.

Para ser congruente con los objetivos de este trabajo, considero que la discusión del mismo debe enmarcarse dentro de lo que es actualmente la situación general de la industria mexicana del plástico y de la investigación científica y tecnológica en esta área.

El petróleo seguirá siendo un espejismo para el pueblo mexicano hasta que seamos capaces de transformarlo en artículos de utilidad y de mayor valor agregado, en lugar de exportarlo como petróleo crudo y de consumirlo como combustible. La reciente liberación de la mayoría de los productos de la petroquímica básica por parte del gobierno, seguramente abrirá mayores y mejores perspectivas para la industria petroquímica secundaria y para todas las industrias que dependan del petróleo; entre éstas se encuentra en primer término la del plástico.

Según datos proporcionados por Raúl Gálvez Alcántar, Presidente de la sección 46 de la Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (Canacintra), correspondiente a fabricantes de artículos de plástico, la subutilización de la capacidad instalada de la industria del plástico asciende a 85 por ciento. /67/

Explicó también que en la industria del plástico intervienen 4 mil 410 empresas, sin considerar más de 4 mil que no se encuentran debidamente registradas. El industrial aceptó que el sector privado dependiente del uso de derivados del

petróleo se ha comportado deslealmente frente a la industria nacional, particularmente ante PEMEX, en la medida en que decidió importar grandes cantidades de materia básica a pesar de que no siempre los precios internos eran mayores. Incluso ahora el precio doméstico es menor en casi 6 por ciento al internacional; sin embargo, las bodegas están a su máxima capacidad y los inventarios de PEMEX, imposibilitados para desplazarse, ascienden ya a 70 mil toneladas de polietileno.

Lamentó el atraso de la tecnología nacional cuando menos en cinco años, lo que ha afectado a las industrias juguetera y del calzado. Las empresas transformadoras del plástico enfrentan serios problemas a escala nacional que amenazan el cierre de las plantas productivas con la consecuente desaparición de fuentes de empleo.

En una visita que realicé al auditorio de Canacintra, en donde se realizó el Segundo Congreso Nacional de Transformadores de los Plásticos y Tercera Semana del Plástico del Instituto Politécnico Nacional en el mes de julio de 1990, encontré un programa de conferencias muy completo con pláticas como México y los plásticos, oportunidades y amenazas. Reciclado de plásticos, Estrategias de éxito para empresas de plásticos en recursos humanos y entorno económico. Cómo usar las computadoras en la industria del plástico. Recursos humanos y apoyos técnicos de las instituciones educativas para la industria de los plásticos I.P.N. y otras instituciones. Desarrollo nacional de maquinaria y moldes para soplado, y otras más.

En la ceremonia inaugural de *Transtoplast '90*, el Director del Instituto Mexicano del Plástico Industrial (IMPI), Rafael Blanco, advirtió que si en doce meses el sistema educativo nacional no crea condiciones para preparar los técnicos y supervisores que requiere el sector *no vamos a tener más remedio que importarlos de Argentina y Brasil /68/*. Blanco indicó que la situación de la industria es tal que del millón 250 mil toneladas de plásticos producidos anualmente, el 50 por ciento son manteles, y juguetes *que se venden en el mercado de Sonora*.

El director del IMPI agregó que mientras del I.P.N egresan cada año 25 ó 30 nuevos técnicos y supervisores *la industria del país requiere casi 50 mil*.

Por otra parte el coordinador de asesores del subsecretario de Industria e Inversión Extranjera de la Secofi, Julio Alfredo Genel, aseguró que ya se avanza hacia una estructura de precios *más congruente con la internacional*. Lo anterior es respuesta a la queja de los industriales del plástico, respecto a que los precios domésticos superan 20 por ciento los dominantes en el exterior. También advirtió que en México *tenemos una gran carencia de capital* lo que impide aprovechar enteramente recursos humanos, capacitarlos y explotar adecuadamente los recursos naturales. Recordó que el propósito gubernamental consiste en que al finalizar el sexenio el acumulado histórico de la inversión extranjera sea de 50 mil millones de dólares. Un aumento de 24 mil millones de dólares en el periodo 1988- 1994.

El funcionario de la Secofi agregó que la modernización de la industria del plástico tiene como elementos básicos:

- 1) Internacionalización de las empresas nacionales,
- 2) Desarrollo tecnológico y mejoramiento de su productividad y calidad,
- 3) Promoción de las exportaciones, y
- 4) Fortalecimiento del mercado interno.

Reconoció que las restricciones presupuestales de los últimos años han impedido la ampliación rápida de la capacidad de la petroquímica básica.

Raúl Galvez Alcantar, Presidente de la sección 46 de la Canacindra: fabricantes de artículos de plásticos, enumeró los problemas del sector: tecnología obsoleta, precios de materia prima nacional 20 por ciento superiores a los internacionales, falta de personal capacitado por la ausencia de instituciones especializadas en el ramo, falta de incentivos y apoyo para la consolidación de los proyectos de exportación, competencia internacional desleal con productos de importación carentes de especificación, y calidad, desproporción entre oferta y demanda en el mercado de los plásticos y falta de normatividad internacional en cuanto a los productos de importación.

Sin embargo, el secretario técnico de la Comisión Petroquímica Mexicana, Juan Antonio Bergés Mestre, al clausurar el congreso, afirmó que el acuerdo de libre comercio entre México y Estados Unidos representa una oportunidad para participar directamente en el mercado de la industria del plástico y un reto para la planta productiva nacional, ante la

necesidad de competir con productos internacionales en calidad y precio /69/. En su opinión, la industria tiene un enorme futuro y su crecimiento en los próximos cinco años se calcula en 6 por ciento anual, lo que representaría un aumento de 30 millones de toneladas para 1995, de las que 10 millones serán consumidas en Estados Unidos.

El cambio tecnológico, agregó Bargés Mestre, prevé importantes aplicaciones para el plástico, sobre todo en la industria automotriz, en donde los componentes de los vehículos pasará de 7 por ciento de este material en 1988, a 12 por ciento para en inicio del siglo XXI. Los países desarrollados consumen 200 kilos de polímeros por habitante al año y México solo 13.

Dentro de la Tercera Semana del Plástico del Instituto Politécnico Nacional se presentó el programa de estudios de la carrera de técnico en plásticos del Instituto Politécnico Nacional, única opción a nivel técnico en el país.

La Universidad Nacional Autónoma de México, como la máxima casa de estudios del país, tiene un enorme compromiso con el desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos altamente capacitados en el área de los polímeros. La U.N.A.M. cuenta con una maestría en Ingeniería Química con orientación en polímeros, y otra en Fisicoquímica con orientación también en polímeros, actualmente se les está dando mucha promoción y apoyo. A nivel licenciatura, semillero de futuros investigadores, se cuentan con dos cursos de polímeros, los cuales, desafortunadamente, están dentro de un paquete optativo y no como materias obligatorias. De tal suerte que un porcentaje de los ingenieros

químicos de la Facultad sale sin tener los conceptos básicos de lo que son los polímeros, la Reología y el procesamiento de plásticos.

El único extrusor con el cual se experimenta en la U.N.A.M. está en el Instituto de Investigaciones en Materiales, donde existe un grupo de investigación dedicado a la extrusión de termoplásticos. Las tesis y trabajos monográficos registrados en la Facultad de Química relacionados con la extrusión de plásticos son pocos.

Es por esto que el impulso y apoyo a la investigación en extrusión de plásticos y a la formación de recursos humanos en esta área es una necesidad de primer orden para la Facultad de Química, para la U.N.A.M. y para el país.

Ante los cambios sociales, políticos y económicos que se están viviendo en los países socialistas y ante la tendencia a la creación de un mercado económico mundial más interrelacionado, los países latinoamericanos no nos podemos quedar atrás. En particular las empresas mexicanas tendrán que poner más atención en su organización ante la reciente apertura económica con los Estados Unidos y con Canadá. Seguramente para muchas de ellas será un reto muy difícil; sin embargo, es una buena oportunidad para incrementar la calidad y competitividad de los productos mexicanos. Si paralelamente se trabaja en la capacitación de recursos humanos y en la investigación en las universidades e institutos, podremos, a mediano plazo, crear tecnología propia y tener una industria mexicana más sólida.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA 79

9. CONCLUSIONES.

Las conclusiones que podemos hacer de este trabajo son las siguientes:

1) Los plásticos han tenido y tienen, una gran importancia en el desarrollo tecnológico y socioeconómico de nuestra época.

2) La simplicidad de fabricación de los plásticos ha sido el factor más importante en el crecimiento de la industria de los plásticos.

3) La principal ventaja del proceso de extrusión es la facilidad de obtener longitudes ilimitadas de material con un perfil constante.

4) El proceso de extrusión es el más aprehendido y estudiado de todo el procesamiento de plásticos.

5) El extrusor es una pieza clave en el procesamiento de plásticos.

6) El extrusor de tornillo es la máquina que más ha contribuido al conocimiento teórico-práctico de la extrusión.

7) En un extrusor, a mayor valor de L/D, habrá más superficie disponible para el mezclado y la plastificación del polímero.

8) Las variables de control para operar a un extrusor son: las RPM del tornillo, la potencia suministrada, la alimentación y la temperatura de operación en las tres zonas del tornillo.

9) Las propiedades más importantes del material plástico a considerar son: temperatura de fundido, temperatura de

transición vítrea, temperatura de degradación térmica, capacidad calorífica, viscosidad del fundido y gravedad específica.

9. BIBLIOGRAFIA.

- 1) Bird R.B. *Transport Phenomena*. Wiley. N.Y. 1960.
- 2) Harris J. *Rheology and non-Newtonian Flow*. Longman. London. 1977.
- 3) Middleman S. *The Flow of High Polymers*. John Wiley & Sons. N.Y. 1968.
- 4) Nielsen L.E. *Polymer Rheology*. Marcel Dekker. N.Y. 1977.
- 5) Seymour R. *Polymer Chemistry*. Marcel Dekker. N.Y. 1981.
- 6) Michaeli W. *Extrusion Dies: Design and engineering computations*. Hanser. Munich. 1984.
- 7) Tadmor Z. *Engineering Principles of Plasticating Extrusion*. Malabar. Florida. R. E. Krieger. 1970.
- 8) Anguita R. *Extrusion de Plasticos*. H. Blumer. Madrid. 1977.
- 9) Bikales N. *Extrusion and other plastics operations*. Wiley-Interscience. New York. 1971.
- 10) Richardson P. *Introduction to extrusion*. Society of Plastics Engineers. 1974.
- 11) Penn W. *PVC Technology*. Applied Science Publisher. London. 3' ed. 1971.
- 12) Middleman S. *Fundamentals of Polymer Processing*. Mc. Graw Hill. EUA. 1977.
- 13) Baird R. *Industrial Plastics*. The Goodheart- Wilcox. South Holland. 1976.
- 14) Driver W. *Plastics Chemistry and Technology*. Van Nostrand Reinhold. 1979.

- 15) Hearle J. *Polymers and Their Properties*. Vol 1. *Fundamentals of Structure and Mechanics*. Ellis Horwood (Wiley). 1982.
- 16) Irone J. *Plastics Process Engineering*. Marcel Dekker. EUA-Basel. 1979.
- 17) Schwartz. *Plastics Materials and Processes*. Van Nostrand Reinhold. 1982.
- 18) Rodriguez F. *Principles of Polymer Systems*. McGraw Hill. N.Y. 1970.
- 19) Chow S. *Petroquímica y Sociedad*. La Ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica. 1987.
- 20) Rangel N. *Los Plásticos: Materiales del Siglo XX*. UNAM, Centro Universitario de Comunicación de la Ciencia. México. 1986.
- 21) *Van Nostrand's Scientific Encyclopedia*. 5th ed. Van Nostrand Reinhold.
- 22) *Encyclopedia of Chemical Technology*. Vol 18. Van Nostrand Reinhold.
- 23) "Upgrades: new profits from old extruders." *Plast World* 42: 46-8 s'84
- 24) "New and improved machines focus on tight process control." *Plast world* ja'85
- 25) "Extrusion systems." *Plast World* 43:44-7 ag'85
- 26) "Extrusion control." *Plast World* 43:52-4+ ag'85
- 27) "Automatic extrusion: CIM drives up output quality." *Plast World* 43:50+ n'85
- 28) "Extruder screw brings new level of control." *Plast World* 43:61+ d'85

- 29) "Processors take aim at quality productivity." *Plast World* 61'86
- 30) "New screw design boost output and quality." *Plast World* 46:71-3+ mr'88
- 31) "How to get new extruders at a fraction of the cost." *Plast World* 31'88
- 32) "What it takes to succeed in coextruder containers." *Plast World* 46:89-91 6'88
- 33) "High- technology processes extend wear life of screws." *Plast World* 47:42-5+ ja'89
- 34) "Pultrusion will lead continued composites growth." *Plast World* 47:12 mr'89
- 35) "Alpine expands choices for HMW- HDPE production." *Plast World* 47:63 ag'89
- 36) "Optimizing the extrusion of LLDPE film." *Plast Eng* 40:33-6 s'84
- 37) "Choosing an extruder for melt devolatilization." *Plast Eng* 42:47-51 j1'86
- 38) "Extrusion without screws." *Plast Eng* 43:49-52 je'87
- 39) "High quality extrusion with planetary rollers." *Plast Eng* 44:30-2 ja'88
- 40) "Blown film dies." *Plast Eng* 44:59 ap'88
- 41) "Extrusion simulation (CAE) workstation." *Plast Eng* 44:85 my'88
- 42) "Extrusion systems recycles contaminated plastic waste." *Plast Eng* 44:39-41 je'88

- 43) "Selecting screws for polyolefin processes." *Plast Eng* 45:57-9 je'89
- 44) "Extrudate swell and drawdown in profile extrusion." *Plast Eng* 45:39-42 s'89
- 45) "Barrier coextrusion goes pushbutton." *Mod Plast Int* f'87
- 46) "Two-stage screw yields highly constant material throughput." *Mod Plast Int* f'89
- 47) "Innovation in extrusion." *Plast Technol* my'88
- 48) "View of the decade." *Plast Technol* ja'90
- 49) "Extrusion in the '90s: Quality at your fingertips." *Plast Technol* f'90
- 50) "Studies on wire coating extrusion. I The reology of wire coating extrusion." *Polym Eng Sc* o'78
- 51) "The pressure drop/ flow rate equation for non Newtonian flow in channels of irregular surfaces cross-section." *Polym Eng Sc* 29:1376- 81 mid o'89
- 52) "Melting mechanism in single screw extrusion." *Polym Eng Sc* 29:258- 67 f'89
- 53) "Bubble growth controlled devolatilization in twin-screw extruders." *Polym Eng Sc* 29:178-85 mid f'89
- 54) "Dependence of melt temperature on screw speed and size in extrusion." *Polym Eng Sc* 29:415-19 mr'89
- 55) "The effect on the extrudate swell on modeling the film blowing process." *Polym Eng Sc* 29:722-30 mid je'89
- 56) "An analysis of the extrusion melting process." *Polym Eng Sc* 29:1376-81 mid o'89
- 57) Gore W.L. et al. *Ind Eng Chem.* 45, 969 (1953).

- 58) McKelvey J. *Polym Processing*. Wiley. N.Y. 1969.
- 59) Squires P. *Soc Plast Eng Trans*. 4(1):7 (1964).
- 60) "Ultimos lanzamientos e novedades no setor de extrusao, apresentados na K-79." *Plásticos em revista* 18:214, 29-40 d'89
- 61) "No ha sido lo suficientemente creativa la industria del plastico." *Plasti-noticias* s'89
- 62) "En la industria del plástico. trabajo seguro para las próximas 5 generaciones." *Plasti-noticias* s'89
- 63) "Los productos mexicanos de plástico mejores que los importados." *Plasti-noticias* s'89
- 64) "Desarrollos en inyeccion, extrusion y compuestos." Michaeli W. *Plast-noticias* d'89
- 65) "Nuevas tendencias en el campo de los polimeros." *Hule mexicano y Plásticos*.
- 66) "El uso de polimeros y plásticos como biomateriales." *Hule Mexicano y Plásticos*. Año 42. No 485. d'86.
- 67) *La Jornada*. 7 julio 1990.
- 68) *La Jornada*. 18 julio 1990.
- 69) *La Jornada*. 21 julio 1990.